

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА



МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

з курсу

«ЕЛЕКТРИЧНА ЧАСТИНА СТАНЦІЙ ТА ПІДСТАНЦІЙ»

(для студентів 4 курсу денної та заочної форм навчання

напряму 6.050701 «Електротехніка та електротехнології»

спеціальності «Електротехнічні системи електроспоживання (за видами)» )

Харків

ХНАМГ

2012

Методичні вказівки до практичних занять з курсу «Електрична частина станцій та підстанцій» (для студентів 4 курсу денної та заочної форм навчання напряму 6.050701 «Електротехніка та електротехнології» спеціальності «Електротехнічні системи електроспоживання (за видами)» ) / Харк.нац. акад. міськ. госп-ва; уклад.: В. М. Гаряжа, Є. Д. Дьяков, В. І. Романченко– Х.: ХНАМГ, 2012.– 43 с.

Укладачі: доц. В.М. Гаряжа  
доц. Є.Д. Дьяков  
В. І. Романченко

Рецензент: д.т.н., проф. Рой В.Ф.

Рекомендовано кафедрою "Електропостачання міст"  
Протокол № 1 від 8.09.2011 р.

## **1. ВИБІР ПОТУЖНОСТІ ТРАНСФОРМАТОРІВ (АВТОТРАНСФОРМАТОРІВ) НА ВУЗЛОВІЙ ПІДСТАНЦІЇ**

Найчастіше на підстанціях встановлюються два трансформатори чи автотрансформатори. В цьому випадку забезпечується надійне живлення споживачів навіть при аварійному відключенні одного з них.

На двохтрансформаторних підстанціях в перші роки експлуатації, коли навантаження не досягло розрахункового, можлива установка одного трансформатора. Протягом цього періоду необхідно забезпечити резервування електропостачання споживачів мережами середньої чи низької напруги. В подальшому при збільшенні навантаження до розрахункового встановлюється другий трансформатор. Якщо при установці одного трансформатора забезпечити резервування мережами СН і НН неможливо або повне розрахункове навантаження підстанції очікується раніше ніж через 3 роки після введення її в експлуатацію, то підстанція споруджується за кінцевою схемою, тобто з двома трансформаторами.

Однотрансформаторні підстанції можуть споруджуватися для живлення невідповідальних споживачів третьої категорії, якщо заміна пошкодженого трансформатора чи його ремонт можливий на протязі доби.

Спорудження однотрансформаторних підстанцій для споживачів другої категорії допускається при наявності централізованого пересувного резерву чи при наявності іншого резервного джерела живлення від мережі СН чи НН, який вмикається вручну чи автоматично.

Централізований трансформаторний резерв широко використовується в схемах електропостачання промислових підприємств. В цьому випадку в цехах споруджуються однотрансформаторні підстанції і передбачається один резервний трансформатор, який при необхідності може бути встановлений на будь-якій цеховій підстанції. Те ж саме може бути передбачене для району електричної мережі, який об'єднує декілька підстанцій, зв'язаних під'їзними дорогами, стан яких дозволяє в будь-яку пору року перевезти резервний трансформатор на будь-яку підстанцію.

Спорудження однотрансформаторних підстанцій забезпечує значну економію капітальних витрат, але не виключає перерв електропостачання, тому рекомендована гранична потужність таких підстанцій за наявності пересувного трансформаторного резерву складає до 25 МВА при 110 кВ, до 6.3 МВА при 35

кВ; при відсутності пересувного резерву 2.5 – 6.3 МВА при 110 кВ, 2.5 – 4.0 МВА при 35 кВ.

### Методика розрахунку

Спочатку складається структурна схема вузлової розподільної підстанції (ВРП) і наносяться відомі значення напруги й повної потужності.

При наявності двох підключених до розподільної установки трансформаторів (автотрансформаторів) повинна виконуватися умова

$$S_{н.т.} \geq 0.7 S_{макс пр} \quad (1.1)$$

де  $S_{макс пр}$  – максимальна прохідна потужність, МВА.

Якщо вибрані автотрансформатори (АТ) то вони перевіряються на допустимість режиму, тобто обмотка НН не повинна перевантажуватися.

Умова  $S_{тип} \geq S_{нн} = S_{спож}$ , в свою чергу  $S_{тип} = K_{виг} S_{ат} n_{ат}$ ,

де  $S_{тип}$  - типова потужність АТ, МВА;

$K_{виг}$  - коефіцієнт вигідності АТ;

$S_{ат}$  - номінальна потужність обраного АТ;

$n_{ат}$  - кількість АТ, підключених до навантаження НН;

$S_{спож}$  - навантаження на НН, МВ-А.

$$K_{виг} = 1 - \frac{1}{K_{m(BH - CH)}} \quad (1.2)$$

$K_{m(BH - CH)}$  - коефіцієнт трансформації АТ,

$$K_{m(BH - CH)} = \frac{U_{BH}}{U_{CH}} \quad (1.3)$$

де  $U_{BH}$ ,  $U_{CH}$  - значення напруги на обмотках ВН, СН, кВ.

Визначається баланс потужностей по ВРП:

$$S_{ЕНС} = S_{ЛЕП} - S_1 - S_2, \quad (1.4)$$

де  $S_{ЕНС}$  - потужність зв'язку з енергосистемою, МВА;

$S_{ЛЕП}$  - потужність, що приходить від електростанції через ЛЕП, МВА;

$S_1, S_2$  - потужності споживачів, МВА.

Якщо отриманий результат має знак "плюс", то надлишок потужності, яка приходить від електростанції віддається в енергосистему, а якщо знак "мінус", то недостача потужності береться з енергосистеми. Визначається коефіцієнт завантаження автотрансформатора:

$$K_{з(AT)} = \frac{S_{макс пр}}{n_{ам} S_{ам}}; K_{з(T)} = \frac{S_{макс пр}}{n_m S_m} \quad (1.5)$$

У відповіді необхідно записати:

- кількість і умовне позначення трансформаторів чи автотрансформаторів;
- коефіцієнти завантаження;
- результат підрахунку балансу потужності по ВРП ( $S_{ЕНС}$ ).

**Приклад.**

Дано:  $S_{ЛЕП}=137$  МВА;  $U_{ЛЕП}=220$  кВ;  $U_{ЕНС}=110$  кВ;  $P_1=30$  МВт;  $U_1=35$  кВ;  $\cos\varphi_1=0.9$ ;  $P_2=50$  МВт;  $U_2=10$  кВ;  $\cos\varphi_2=0.85$ ;

Необхідно: скласти структурну схему ВРП; розрахувати й вибрати трансформатори; перевірити АТ на допустимість режиму роботи.

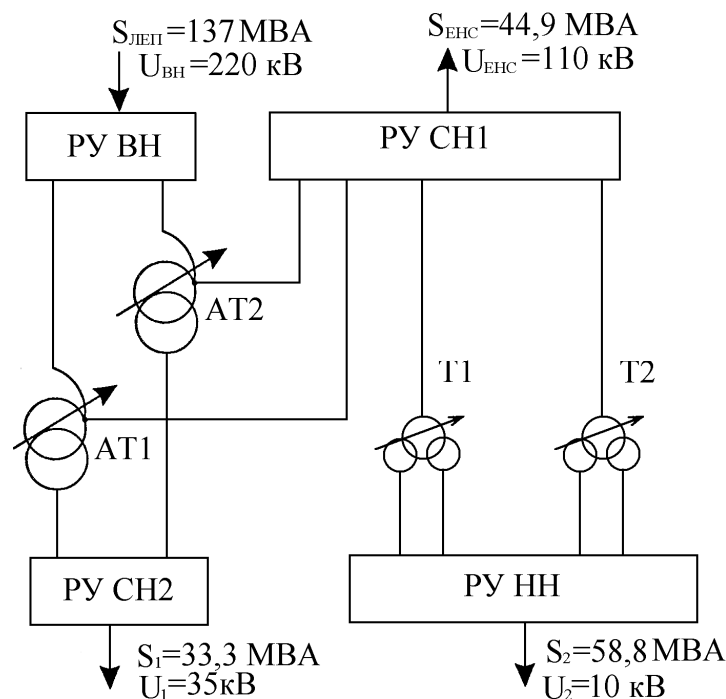


Рис. 1.1 – Структурна схема ВРУ

**Розв'язання:**

Складаємо структурну схему ВРП для погодження чотирьох різних напруг (рис. 1) і наносимо необхідні дані.

Визначаємо повні потужності споживачів

$$S_1 = \frac{P_1}{\cos \varphi_1} = \frac{30}{0.9} = 33.3 \text{ МВА}; S_2 = \frac{P_2}{\cos \varphi_2} = \frac{50}{0.85} = 58.8 \text{ МВА}$$

Визначаємо розрахункові потужності трансформаторів й автотрансформаторів за найбільшими значеннями:

$$S_{am} \geq S_{am.p} = 0.7 S_{ЛЕП} = 0.7 \times 137 = 95.9 \text{ МВА}$$

$$S_m \geq S_{m.p} = 0.7 S_2 = 0.7 \times 58.8 = 41.2 \text{ МВА}$$

За каталогами вибираємо трансформатори і автотрансформатори після чого визначаємо коефіцієнти завантаження  $K_3$ .

2×АТДЦТН 125000–220/110/35

2×ТРДН 63000–110/10

$U_{BH}=230 \text{ кВ}; U_{CH}=110 \text{ кВ}; U_{HH}=38.5 \text{ кВ}$

$U_{BH}=115 \text{ кВ}; U_{HH}=10.5–10.5 \text{ кВ}$

$\Delta P_{xx} = 65 \text{ кВт}$

$\Delta P_{xx} = 50 \text{ кВт}$

$\Delta P_{кз(BH-CH)} = 315 \text{ кВт}, u_{кз(BH-CH)} = 11\%$

$\Delta P_{кз} = 245 \text{ кВт}$

$\Delta P_{кз(BH-HH)} = 280 \text{ кВт}, u_{кз(BH-HH)} = 45\%$

$i_{xx} = 0.5\%$

$\Delta P_{кз(CH-HH)} = 275 \text{ кВт}, u_{кз(CH-HH)} = 28\%$

$i_{xx} = 0.4\%$

$$K_{з(AT).} = \frac{S_{\phi.am}}{n_{am} S_{am}} = \frac{137}{2 \times 125} = 0.55 \quad K_{з(T).} = \frac{S_{\phi.m}}{n_m S_m} = \frac{58.8}{2 \times 63} = 0.47$$

Перевіряємо АТ на допустимість роботи згідно з умовою

$$S_{min} \geq S_1; S_{min} = K_{виз} S_{am} = 0.5 \times 125 = 62.5 \text{ МВА}; K_{виз} = 1 - \frac{1}{K_{m(BH-CH)}} 1 - \frac{1}{2} = 0.5$$

$$2 \times 62.5 \geq 33.3 \text{ МВА}$$

Умова виконується навіть при роботі одного автотрансформатора.

Визначаємо баланс потужностей по ВРП

$$S_{ЕНС} = S_{ЛЕП} - S_1 - S_2 = 137 - 33.3 - 58.8 = 44.9 \text{ МВА}$$

Позитивне значення  $S_{ЕНС}$  означає, що електростанція повністю забезпечує споживачів і 44.9 МВА віддає в енергосистему.

Відповідь: На ВРУ передбачаємо установку двох автотрансформаторів АТДЦТН 125000–220/110/35 і двох трансформаторів ТРДН 63000–110/10. Кое-

фіцієнт завантаження автотрансформаторів  $K_{з.(AT)} = 0.55$ , а трансформаторів  $K_{з.(T)} = 0.47$ , потужність видачі в енергосистему  $S_{ЕНС} = 44.9$  МВА.

Таблиця 1-Завдання до практичного заняття

Варіант	S <sub>ЛЕП</sub> , МВА	U <sub>ЛЕП</sub> , кВ	U <sub>ЕНС</sub> , кВ	Споживач 1			Споживач 2		
				P <sub>1</sub> , МВт	U <sub>1</sub> , кВ	cos φ <sub>1</sub>	P <sub>2</sub> , МВт	U <sub>2</sub> , кВ	cos φ <sub>2</sub>
1	187	220	110	63	6,3	0.8	25	35	0.95
2	280	330	150	125	10	0.81	400	20	0.94
3	198	220	110	250	6.3	0.82	63	10	0.93
4	297	330	110	200	35	0.83	80	6.3	0.92
5	210	220	150	200	6,3	0.84	40	35	0.91
6	420	330	110	250	10	0.85	630	20	0.90
7	176	220	150	125	6.3	0.86	125	10	0.89
8	290	330	110	250	35	0.87	80	6.3	0.88
9	190	220	110	125	6,3	0.88	63	35	0.87
10	390	330	150	63	10	0.89	530	20	0.86
11	195	220	110	125	6.3	0.90	125	10	0.85
12	314	330	150	200	35	0.91	80	6.3	0.84
13	195	220	110	200	6,3	0.92	80	35	0.83
14	380	330	110	125	10	0.93	400	20	0.82
15	205	220	150	200	6.3	0.94	80	10	0.81
16	320	330	110	250	35	0.95	63	6.3	0.8
17	194	220	150	200	6,3	0.94	80	35	0.81
18	510	330	110	200	10	0.93	400	20	0.82
19	197	220	110	125	6.3	0.92	80	10	0.83
20	360	330	150	200	35	0.91	80	6.3	0.84
21	145	220	110	63	6,3	0.90	63	35	0.85
22	370	330	150	250	10	0.89	630	20	0.86
23	215	220	110	125	6.3	0.88	125	10	0.87
24	385	330	110	250	35	0.87	80	6.3	0.88

## 2. РОЗРАХУНОК ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ І ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ТРАНСФОРМАТОРІ

### Методика розрахунку

Загальну величину втрат ( $\Delta P_T$ ) активної потужності (кВт) в трансформаторі визначають за формулою

$$\Delta P_T = \Delta P_{ст} + \Delta P_{об} K_3^2 \quad (2.1)$$

де  $\Delta P_{ст}$  - втрати в сталі, кВт; (при номінальній напрузі  $U_{ном}$  від навантаження не залежать, а залежать тільки від потужності трансформатора);

$\Delta P_{об}$  - втрати в обмотках, кВт; (залежать від навантаження);

$\Delta P_{об} \approx \Delta P_{кз}$  (втрати короткого замикання, КЗ, кВт);  $\Delta P_{ст} \approx \Delta P_{хх}$ ;

$K_3$  – коефіцієнт завантаження трансформатора, відносних одиниць Це відношення фактичного навантаження трансформатора до його номінальної потужності:

$$K_3 = \frac{S_{\phi}}{S_{нт}} \quad (2.2)$$

Загальну величину втрат  $\Delta Q_T$  реактивної потужності (квар) в трансформаторі визначають за формулою

$$\Delta Q_T = \Delta Q_{ст} + \Delta Q_{рас} K_3^2 \quad (2.3)$$

де  $\Delta Q_{ст}$  - втрати реактивної потужності на намагнічування, квар. Потужність намагнічування не залежить від навантаження

$$\Delta Q_{ст} \approx i_{хх} S_{нт} 10^{-2} \quad (2.4)$$

$\Delta Q_{розс}$  - втрати реактивної потужності розсіювання в трансформаторі при номінальному навантаженні;

$$\Delta Q_{розс} \approx u_{кз} S_{нт} 10^{-2}; \quad (2.5)$$

$i_{хх}$  - струм холостого ходу трансформатора %;

$u_{кз}$  - напруга короткого замикання %;

$S_{нт}$  - номінальна потужність трансформатора, кВА.

Значення  $\Delta P_{хх}$ ,  $\Delta P_{об}$ ,  $i_{хх}$ ,  $u_{кз}$  приймаються за даними каталогів для конкретного трансформатора.

На підставі розрахунку втрат потужності можна визначити втрати електроенергії. Для визначення втрат електроенергії застосовують метод, заснований на поняттях часу найбільших втрат ( $\tau$ ) і часу використання максимального навантаження ( $T_M$ ). Час максимальних втрат ( $\tau$ ) - умовне число годин, протягом



якого максимальний струм, що протікає безперервно, створює втрати енергії, рівні дійсним втратам енергії за рік.

Час використання максимуму навантаження ( $T_M$ ) - умовне число годин, протягом якого при максимальному навантаженні передається чи споживається за рік стільки енергії, скільки при роботі по дійсному графіку.  $\tau = F(\cos \varphi, T_M)$  визначається за графіком (рис. 2.1 )

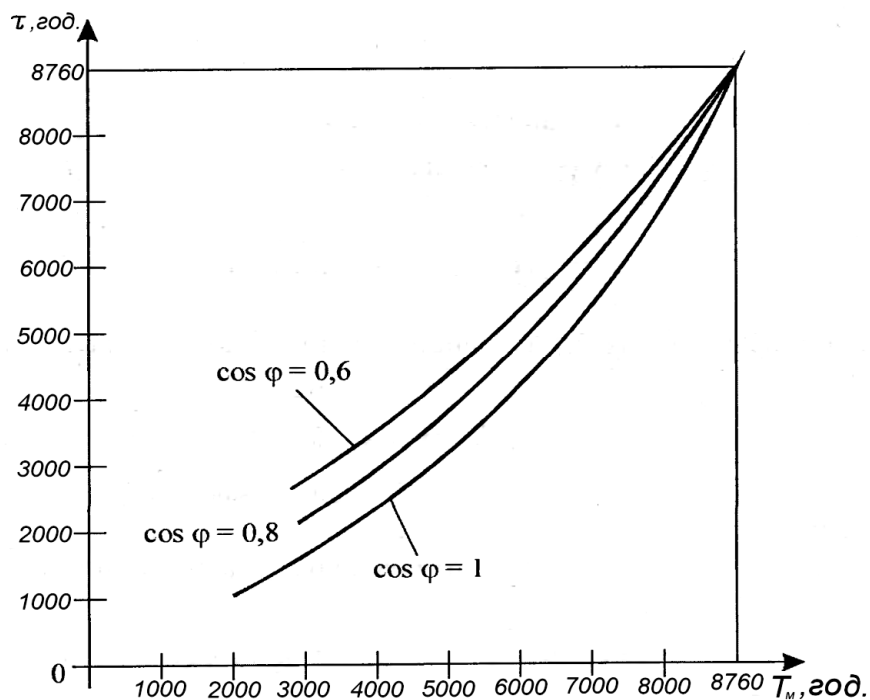


Рис. 2.1 – Графік залежності  $\tau = F(\cos \varphi, T_M)$

Загальна втрата активної енергії (кВт×год.) в трансформаторі визначається за формулою

$$\Delta W_{aT} = \Delta W_{ct} + \Delta W_{ob} = \Delta P_{ct} \times t + \Delta P_{ob} \times K_3^2 \times \tau. \quad (2.6)$$

Загальна втрата реактивної енергії (квар×год) в трансформаторі визначається за формулою

$$\Delta W_{pT} = S_{HT}(i_{xx}t + u_{K3} K_3^2 \tau) \times 10^{-2} \quad (2.7)$$

### **Приклад.**

Дано:

Трансформатор - ЕС-Бл, тип - ТД 80000-220/10,5:  $\Delta P_{xx} = 79$  кВт;  
 $\Delta P_{K3} = 315$  кВт;  $u_{K3} = 11\%$ ;  $i_{xx} = 0,45\%$ ;  
 $K_3 = 0,99$ ;  $\cos \varphi = 0,8$ ;  $T_M = 5000$  год.;  $t = 5500$  год.

Потрібно:

- визначити втрати потужності за рік ( $\Delta P_T, \Delta Q_T, \Delta S_T$ );
- визначити втрати енергії за рік ( $\Delta W_{a.T}, \Delta W_{p.T}, \Delta W_T$ ).

*Рішення:*

Втрати активної потужності в трансформаторі

$$\Delta P_T = \Delta P_{ст} + \Delta P_{об} \times K_3^2 = 79 + 315 \times 0,99^2 = 387,7 \approx 3,9 \times 10^2 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{об} \approx \Delta P_{кз} = 315 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_{ст} \approx \Delta P_{хх} = 79 \text{ кВт.}$$

Втрати реактивної потужності в трансформаторі

$$\Delta Q_T = \Delta Q_{ст} + \Delta Q_{рас} K_3^2 = 3,6 \times 10^2 + 88 \times 10^2 \times 0,99 = 89,9 \times 10^2 \text{ квар}$$

$$\Delta Q_{ст} \approx i_{хх} S_{нт} 10^{-2} = 0,45 \times 80000 \times 10^{-2} = 360 \text{ квар};$$

$$\Delta Q_{рас} \approx u_{кз} S_{нт} 10^{-2} = 11 \times 80000 \times 10^{-2} = 88 \times 10^2 \text{ квар.}$$

Повні втрати потужності в трансформаторі

$$\Delta S_T = \sqrt{\Delta P_T^2 + \Delta Q_T^2} = \sqrt{(3,9 \times 10^2)^2 + (89,9 \times 10^2)^2} = 90,1 \times 10^2 \text{ кВА.}$$

Втрати активної енергії в трансформаторі

$$\begin{aligned} \Delta W_{a.T} &= \Delta W_{ст} + \Delta W_{об} = \Delta P_{ст} \times t + \Delta P_{об} \times K_3^2 \tau = \Delta P_{ст} \times t + \Delta P_{кз} \times K_3^2 \tau = \\ &= 79 \times 5500 + 315 \times 0,99^2 \times 3500 = 1,5 \times 10^6 \text{ кВт} \times \text{ч.} \end{aligned}$$

За графіком (рисунок 3.1) визначається

$$\tau = F(\cos \varphi, T_M) = F(0,8; 5000) = 3500 \text{ год.}$$

Втрати реактивної енергії в трансформаторі

$$\begin{aligned} \Delta W_{p.T} &= S_{нт} (i_{хх} \times t + u_{кз} \times K_3^2 \times \tau) \times 10^{-2} = 80000 (0,45 \times 5500 + 11 \times 0,99^2 \times \\ &\times 3500) \times 10^{-2} = 32,2 \times 10^6 \text{ квар} \times \text{год.} \end{aligned}$$

Повні втрати енергії в трансформаторі

$$\Delta W_T = \sqrt{\Delta W_{a.m}^2 + \Delta W_{p.m}^2} = \sqrt{(1,5 \times 10^6)^2 + (32,2 \times 10^6)^2} = 34,5 \times 10^6 \text{ кВА} \times \text{год.}$$

Відповідь: Річні втрати в блоковому трансформаторі електростанції:

$$\Delta P_T = 3,9 \times 10^2 \text{ кВт};$$

$$\Delta W_{a.T} = 1,5 \times 10^6 \text{ кВт} \times \text{год.};$$

$$\Delta Q_T = 89,9 \times 10^2 \text{ квар};$$

$$\Delta W_{p.T} = 32,2 \times 10^6 \text{ квар} \times \text{год.};$$

$$\Delta S_T = 90,1 \times 10^2 \text{ кВА};$$

$$\Delta W_T = 34,5 \times 10^6 \text{ кВА} \times \text{год.}$$

### Дані для практичного заняття

Варіант	Місце установки*)	Кз	cos φ	T <sub>м</sub> , годин	t, годин
1	ВРП	0,65	0,88	3000	4000
2	ЕС-ГРУ	0,78	0,82	4500	8000
3	ЕС-Бл.	0,82	0,79	3500	5000
4	ВРП	0,58	0,87	5500	7500
5	ЕС-ГРУ	0,67	0,83	4000	6000
6	ЕС-Бл.	0,79	0,84	6500	7500
7	ВРП	0,66	0,86	4500	7000
8	ЕС-ГРУ	0,59	0,78	6500	7500
9	ЕС-Бл.	0,8	0,85	5000	8000
10	ВРП	0,65	0,88	3500	4000
11	ЕС-ГРУ	0,78	0,82	4500	5500
12	ЕС-Бл.	0,82	0,79	4200	5000
13	ВРП	0,58	0,86	4600	5500
14	ЕС-ГРУ	0,67	0,78	5100	6000
15	ЕС-Бл.	0,79	0,85	6000	6500
16	ВРП	0,66	0,87	5300	7000
17	ЕС-ГРУ	0,59	0,83	6000	7500
18	ЕС-Бл.	0,8	0,84	5400	8000
19	ВРП	0,65	0,86	5900	6700
20	ЕС-ГРУ	0,78	0,78	3800	4500
21	ЕС-Бл.	0,82	0,85	3400	5000
22	ВРП	0,58	0,84	4100	5500
23	ЕС-ГРУ	0,67	0,86	4800	6000
24	ЕС-Бл.	0,79	0,78	5400	6500
25	ВРП	0,66	0,85	5500	7000

\*) – ВРП – вузлова розподільна підстанція; ЕС – електростанція; ГРУ – генераторний розподільний пристрій; Бл. – блоковий розподільний пристрій.

### ***Контрольні запитання до практичного заняття***

1. На які види поділяються втрати в трансформаторі?
2. Від чого залежать втрати активної потужності?
3. Від чого залежать втрати реактивної потужності?
4. На величину яких втрат енергії впливає час найбільших втрат  $\tau$  ?

### 3. ВИБІР І ПЕРЕВІРКА ВИМИКАЧІВ ТА РОЗ'ЄДНУВАЧІВ ВИСОКОЇ НАПРУГИ

Вимикачі високої напруги вибираються за напругою, струмом, категорією розміщення, конструктивним виконанням і комутаційною здатністю.

При цьому повинні виконуватися такі умови

$$U_{\text{мном}} \leq U_{\text{ном}} \quad (3.1)$$

де  $U_{\text{мном}}$  – номінальна напруга мережі, кВ;

$U_{\text{ном}}$  – номінальна напруга вимикача, кВ

$$I_{\text{розр}} \leq I_{\text{ном}}, \quad (3.2)$$

де  $I_{\text{ном}}$  – номінальний тривалий струм вимикача.

Розрахунковий струм  $I_{\text{розр}}$  вибирають з найбільш несприятливого експлуатаційного режиму. Наприклад, при наявності двох паралельних ліній  $I_{\text{розр}}$  визначають за умови відключення однієї з них, тобто  $I_{\text{розр}} = 2I_{\text{роб}}$  ( $I_{\text{роб}}$  – тривалий робочий струм однієї лінії)

Для тупикової підстанції

$$I_{\text{роб}} = \frac{0.7 S_{\text{н.т}}}{\sqrt{3} U_{\text{м.ном}}}, \quad (3.3)$$

де  $S_{\text{н.т}}$  – номінальна потужність силового трансформатора, МВА

Для прохідної підстанції, якщо відома потужність транзиту

$$I_{\text{роб}} = \frac{S_{\text{транз}}}{\sqrt{3} U_{\text{м.ном}}}, \quad (3.4)$$

де  $S_{\text{транз}}$  – найбільша транзитна потужність, МВА.

Якщо потужність транзиту невідома, то струм прохідного вимикача визначають як струм перевантаженого на 40 % трансформатора.

Перевіряються вимикачі:

1) на здатність вимикати

– за симетричною (періодичною) складовою струму КЗ, що відповідає розрахунковому часу  $\tau$  відключення короткого замикання:

$$I_{\text{н}\tau} \leq I_{\text{відк.ном.}} \quad (3.5)$$

– за номінальним аперіодичним струмом відключення,  $i_{\text{ат}}$

$$i_{\text{ат}} \leq i_{\text{а.ном}} = \sqrt{2} \beta_{\text{ном}} I_{\text{відкл.ном}} \quad (3.6)$$

де  $i_{a.ном}$  – номінальний аперіодичний струм відключення вимикача:

$\beta_{ном}$  – номінальна відносна складова аперіодичного струму відключення для часу  $\tau$  (% або відносні одиниці);

$i_a$  – аперіодична складова струму КЗ кола, яке розраховується

$$i_a = \sqrt{2} \times I_{п,0} \times e^{-t/T_a}, \quad (3.7)$$

де  $T_a$  – час затухання аперіодичної складової струму КЗ, с.;

$t$  – власний час вимикання вимикача, с.

При  $I_{н\tau} \leq I_{відкл.ном.}$ , а  $i_{a\tau} \geq i_{a.ном.}$  допускається виконання умови

$$i_{a\tau} = \sqrt{2} I_{н\tau} + i_{a\tau} \leq I_{відкл.ном.} \times (1 + \beta_{ном.}) \quad (3.8)$$

2. на динамічну стійкість струмам КЗ:

– за початковим періодичним струмом КЗ:

$$I_{н0} \leq I_{гр.наскр.}, \quad (3.9)$$

де  $I_{гр.наскр.}$  – граничний наскрізний струм (діюче значення періодичної складової), припустимий для розглянутого вимикача.

– за ударним струмом КЗ

$$i_{y0} \leq i_{гр.наскр.}, \quad (3.10)$$

$$i_{y0} = \sqrt{2} \times I_{н,0} \times k_y, \quad (3.11)$$

де  $i_{гр.наскр.}$  – номінальний струм електродинамічної стійкості вимикача (амплітудне значення граничного повного струму, припустимого для даного апарату);

$k_y$  – ударний коефіцієнт.

3. на термічну стійкість струмам КЗ за умовою:

$$B_k \leq I_{т.ном.}^2 \cdot t_m, \quad (3.12)$$

де  $B_k$  – інтеграл Джоуля,  $кА^2 \times с$ ;

Інтеграл Джоуля приблизно визначають за формулою

$$B_k = I_{н0}^2 (t_{відкл.} + T_a), \quad (3.13)$$

де  $t_{відкл.} = t_{з.} + t_{вим}$  ( $t_{з.}$  – час дії релейного захисту, с, можна прийняти рівним часові спрацювання резервного захисту, який дорівнює 4 с),  $t_{вим}$  – час вимикання вимикача (за каталогом). Рекомендується передбачати застосування вакуумних, елегазових чи маломасляних вимикачів.

Роз'єднувачі високої напруги вибираються за напругою, струмом, категорією розміщення і конструктивним виконанням (умови 3.1; 3.2) і перевіряються за (3.10; 3.13).

### Приклад вибору

Вибрати вимикачі і роз'єднувачі для розподільної установки підстанції за наступних умов:  $U_{ном} = 110$  кВ;  $I_{роб. нб} = 184$  А;  $I_{п.0} = 11,1$  кА;  $k_{уд} = 1,7$ ;  $T_a = 0.025$  с;  $I_{т.ном} = 20$  кА;  $t_T = 3$  с;  $I_{п.т} = 11,1$  кА; установка відкрита.

Вибір виконуємо в табличній формі. Попередньо за каталожними даними приймаємо маломасляний вимикач зовнішньої установки типу ВМТ–110Б-20/1000 УХЛ1. Згідно з ними  $t = 0.08$  с.;  $\beta = 25\%$

Розраховуємо аперіодичну складову струму за (3.7) і ударний струм КЗ за формулою (3.11)

$$i_a = \sqrt{2} \times I_{п.0} \times e^{-t/T_a} = \sqrt{2} \times 11.1 \times e^{-0.08/0.025} = 0.64 \text{ кА}$$

$$i_y = \sqrt{2} \times I_{п.0} \times k_y = \sqrt{2} \times 11.1 \times 1.7 = 26.61 \text{ кА}$$

Інтеграл Джоуля для струму КЗ визначаємо за (3.13)

$$B_k = I_{п.0}^2 (t_{відкл.} + T_a) = 11.1^2 (0.08 + 0.025) = 12.94 \text{ кА}^2 \text{с}$$

Таблиця 3.1 – Вибір вимикачів

Умова вибору	Розрахункові значення	Каталожні значення
$U_{м.ном} \leq U_{ном}$	110кВ	110кВ
$I_{розр} \leq I_{ном}$	184А	1000А
$I_{п.0} \leq I_{гр.наскр.}$	11,1кА	20кА
$i_y \leq i_{гр.наскр.}$	26,71кА	52кА
$I_{п.т} \leq I_{від. ном}$	11,1кА	20 кА
$i_{а,т} \leq i_{а ном,т}$	0,64 кА	$1.41 \times (25/100) \times 20 = 7.1$ кА
$B_k \leq I_T^2 \times t_T$	12,94кА <sup>2</sup> с	$20^2 \times 3 = 1200$ кА <sup>2</sup> с

Як видно з табл. 3.1, вимикач ВМТ–110Б-20/1000 УХЛ1 відповідає умовам вибору.

За каталожними даними попередньо приймаємо роз'єднувач зовнішньої установки типу РДЗ.1–110/1000–УХЛ1 з одним комплектом заземлювальних ножів.

Таблиця 3.2 – Вибір роз'єднувача

Умова вибору	Розрахункові значення	Каталожні значення
$U_{м.ном} \leq U_{ном}$	110кВ	110кВ
$I_{розр} \leq I_{ном}$	184А	1000А
$i_y \leq i_{гр.наскр}$	26,71кА	80кА
$B_k \leq I_T^2 \times t_T$	12,94кА <sup>2</sup> с	$31.52 \times 4 = 3969$ кА <sup>2</sup> с

Згідно з порівняльною таблицею роз'єднувач типу РДЗ.1–110/1000–УХЛ1 відповідає умовам вибору.

Таблиця 3.3 – Завдання до практичного заняття (Параметри кіл для яких необхідно вибрати апарати)

Варіант	Місце установки	$U_{ном}, \text{кВ}$	$I_{розр}, \text{кА}$	$I_{п.о.}, \text{кА}$	$k_{уд}, \text{кА}$	$T_a, \text{С}$	$I_{пт}, \text{кА}$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	ЗРУ	6	630	18	1.6	0.04	18
2	ВРУ	35	100	19	1.5	0.05	19
3	ЗРУ	10	2000	30	1.4	0.06	30
4	ВРУ	110	550	14	1.3	0.025	14
5	ЗРУ	35	300	16	1.2	0.081	16
6	ВРУ	35	350	17	1.1	0.068	17
7	ЗРУ	10	1200	25	1.07	0.07	25
8	ВРУ	110	450	18.5	1.08	0.03	18.5
9	ЗРУ	10	2100	29	1.7	0.04	29
10	ВРУ	35	250	20	1.5	0.11	20
11	ЗРУ	10	1500	26	1.4	0.092	26
12	ВРУ	110	740	22	1.3	0.03	22
13	ЗРУ	10	2500	23	1.6	0.027	23
14	ВРУ	35	340	20.5	1.5	0.054	20.5
15	ЗРУ	6	2200	14	1.4	0.64	14
16	ВРУ	110	750	21	1.3	0.025	21
17	ЗРУ	6	1400	22	1.2	0.073	22
18	ВРУ	35	360	13	1.1	0.062	13
19	ЗРУ	6	2800	15	1.07	0.025	15
20	ВРУ	110	390	16	1.08	0.03	16
21	ЗРУ	35	420	20	1.7	0.085	20
22	ВРУ	110	790	24	1.5	0.04	24
23	ЗРУ	35	650	17	1.4	0.07	17
24	ВРУ	110	590	23	1.3	0.045	23

### ***Контрольні запитання до практичного заняття***

1. Пояснити призначення вимикачів.
2. За якими критеріями вибираються вимикачі?
3. За якими критеріями перевіряються вимикачі?
4. За якими критеріями вибираються роз'єднувачі?
5. За якими критеріями перевіряються роз'єднувачі?
6. Класифікація вимикачів за способом гасіння дуги.
7. Пояснити призначення роз'єднувачів.

## 4. ВИБІР І РОЗРАХУНОК ШИН ТА ІЗОЛЯТОРІВ

Шини і ізолятори розподільних установок вибираються за номінальними параметрами (струм, напруга), які відповідають нормальному режиму і умовам навколишнього середовища і перевіряються на режим короткого замикання.

### 4.1. Перевірка шин на електродинамічну стійкість

Перевірка шин на динамічну стійкість зводиться до механічного розрахунку шинної конструкції при КЗ. Електродинамічні сили, які виникають при КЗ, носять коливальний характер і мають періодичні складові з частотою 50 і 100 Гц. Ці сили приводять шини і ізолятори, що є динамічною системою, в коливальний рух. Деформація елементів конструкції і відповідні механічні напруги в матеріалі залежать від складових електродинамічної сили і від власної частоти елементів, приведених в коливання.

Особливо великі механічні напруги виникають в умовах резонансу, коли власні частоти системи «шини – ізолятори» виявляються близькі до 50 або 100 Гц.. Якщо ж власні частоти системи менші 30 або більші 200 Гц, то механічного резонансу не виникає і перевірка шин на електродинамічну стійкість проводиться в припущенні, що шини і ізолятори є статичною системою з навантаженням, рівним максимальній електродинамічній силі при КЗ.

В більшості використовуваних конструкцій шин ці умови виконуються, і ПУЕ не вимагають перевірки шин на електродинамічну стійкість з урахуванням механічних коливань.

В окремих випадках, наприклад при проектуванні нових конструкцій РУ з жорсткими шинами, визначається частота власних коливань за такими виразами:

$$\text{для алюмінієвих шин} \quad f_0 = \frac{173.2}{l^2} \sqrt{\frac{J}{S}}; \quad (4.1)$$

$$\text{для мідних шин} \quad f_0 = \frac{125.2}{l^2} \sqrt{\frac{J}{S}}, \quad (4.2)$$

де  $l$  – відстань (проліт) між ізоляторами, м;  $S$  – площа поперечного перерізу шини,  $\text{см}^2$ ;  $J$  – момент інерції поперечного перерізу шини щодо осі, перпендикулярної напрямку згинаючої сили,  $\text{см}^4$ ;

$$J = \frac{k \times b \times h^3}{12} \quad (4.3)$$



де  $b$  – товщина шини, см;  $h$  – ширина шини, см;  $k = 2$ , кількість шин у пакеті.

Змінюючи довжину прольоту і форму перерізу шин, добиваються, щоб механічний резонанс був виключений, тобто щоб  $f_0 > 200$  Гц. Якщо це не вдається, то проводиться спеціальний розрахунок шин з урахуванням динамічних зусиль, що виникають при коливаннях шинної конструкції.

При розрахунках шин, як статичної системи, виходять з допущення, що шина кожної фази є балкою яка має багато прольотів і вільно лежить на жорстких опорах, з рівномірно розподіленим навантаженням. В цьому випадку згинаючий момент визначається виразом

$$M_0 = \frac{fl^2}{10}, \quad (4.4)$$

де  $f$  – сила, що припадає на одиницю довжини шини, Н/м.

В найважчих умовах знаходиться середня фаза, яка приймається за розрахункову; а за розрахунковий вид КЗ приймається трифазне. Максимальна сила, що припадає на одиницю довжини середньої фази при трифазному КЗ

$$F = \frac{0.176 \times k_\phi \times i_{y\phi}^2}{a}, \quad (4.5)$$

де  $i_{y\phi}$  – ударний струм КЗ, кА;  $a$  – відстань між осями суміжних фаз, м.

$k_\phi$  – коефіцієнт форми, що враховує розміщення шин на головці ізолятора.

Механічна напруга (в мегапаскалях), що виникає в матеріалі шини

$$\sigma_{розр.} = \frac{M}{W}, \quad (4.6)$$

де  $W$  – момент опору шини, м<sup>3</sup>.

Ця напруга повинна бути менше допустимої напруги  $\sigma_{дон}$  (таблиця 4.1) або рівною їй

$$\sigma_{розр.} \leq \sigma_{дон}. \quad (4.7)$$

Момент опору залежить від форми перерізу шин, їх розмірів і взаємного розташування (рис. 4.1, 4.2).

Виконання умови електродинамічної стійкості шин забезпечується відповідним вибором відстані між шинами  $a$ , прольоту між опорними ізоляторами  $l$ , а також розташування і форми перерізу шин. Відстань  $a$  приймається відповідно до типових конструкцій універсальних РУ в межах 40–80 см. Проліт  $l$  вибирається в межах 1,5–2 м залежно від конструктивного виконання РУ. Для шин збірних РУ значення  $l$  рекомендується брати рівним або кратним кроку комірки.

Вибраний проліт не повинен перевищувати найбільшого допустимого значення  $l_{\text{макс}}$ , яке визначається за виразом

$$l_{\text{макс.}} = \sqrt{\frac{10M_{\text{макс}}}{f}} = \sqrt{\frac{10\sigma_{\text{дон}} W}{f}}. \quad (4.8)$$

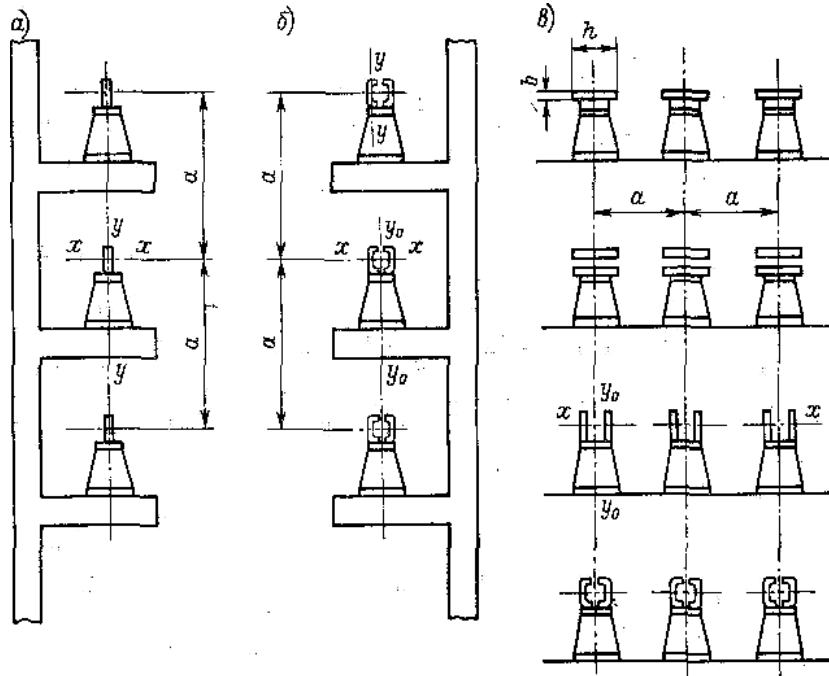


Рис. 4.1 – Різні способи установки шин

Таблиця 4.1 – Допустима механічна напруга в матеріалі шин

Матеріал	$E \times 10^4$ МПа	$\sigma_{\text{дон}}$ , МПа
Алюміній А0, А1	7	82.3
Алюмінієвий сплав АД0	–	41.2–48
Алюмінієвий сплав АД31Т	–	89.2
Алюмінієвий сплав АД331Т	–	137.2
Мідний сплав МГМ	10	171.5–178.4
Мідний сплав МГТ	10	171.5–205.8
Сталь Ст.3	20	260.7–322.4

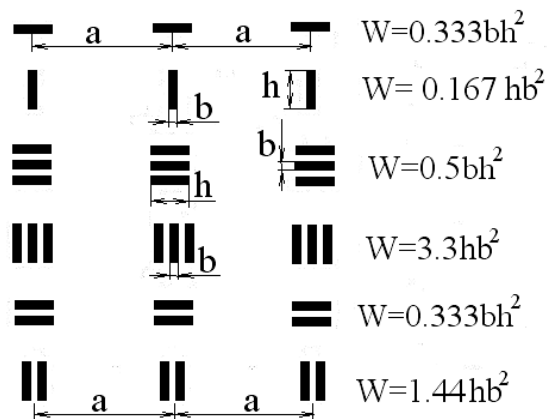


Рис. 4.2 – Моменти опору для характерних профілів і варіантів розташування шин

В багатосмугових шинах, коли в пакет входять дві або три смуги, виникають електродинамічні зусилля між фазами, і між смугами всередині пакету. Зусилля між смугами не повинні приводити до їх доторкування.

Для додання пакету жорсткості і попередження доторкування смуг встановлюються прокладки з матеріалу шини (рис. 8.3). Відстань між ними  $l_{\Pi}$  вибирається так, щоб електродинамічні сили при КЗ не викликали зіткнення смуг:

$$l_n < 0.216 \sqrt{a_n / i_y^3} \sqrt{E J_n / k_{\phi}}, \quad (4.9)$$

де  $i_y$  – ударний струм трифазного КЗ;

$a_n$  – відстань між осями смуг, см;

$J_n = hb^3/12$  – момент інерції смуги, см<sup>4</sup>;

$k_{\phi}$  – коефіцієнт форми шин (Рисунок 4.4), що враховує вплив поперечних розмірів провідника на сили взаємодії.

Щоб не відбулося різкого збільшення зусиль в смугах в результаті механічного резонансу, частота власних коливань системи повинна бути більшою 200 Гц. Виходячи з цього значення  $l_n$  вибирається ще за однією умовою:

$$l_n < 1.33 \times 10^{-3} \sqrt[4]{E J_n / m_n}, \quad (4.10)$$

де  $m_n$  – маса смуги на одиницю довжини, кг/м.

Враховується менше з двох отриманих значень.

Повна напруга в матеріалі шини складається з двох складових –  $\sigma_n$  і  $\sigma_{\phi}$ . Напруга від взаємодії фаз  $\sigma_{\phi}$  знаходиться так само, як і для односмугових шин ( $W_{\phi}$  приймається відповідно до рис. 4.2).



Рис. 4.3 – Двосмугові шини

При визначенні напруги від взаємодії смуг  $\sigma_n$  приймають наступний розподіл струму між смугами: в двосмугових шинах – по 0.5  $i_y$  на смугу; в трьох смугових – 0.4  $i_y$  в крайніх і 0.2  $i_y$  в середній. Смуги розглядають як балку із защемленими кінцями і рівномірно розподіленим навантаженням; максимальний згинаючий момент (в ньютон-метрах) і  $\sigma_n$  (в мегапаскалях) визначають за виразами

$$M_n = f_n l_n^2 / 12; \sigma_n = f_n l_n^2 / (12 W_n) \quad (4.11)$$

Зусилля  $f_a$  при будь-якому розташуванні багатосмугових шин діє на ширину грань шини і момент опору  $W_n = b^2 h / 6$ . (4.12)

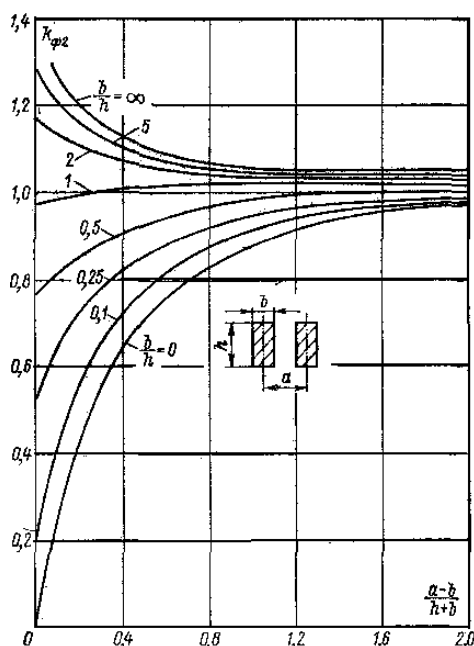


Рис. 4.4 – Криві для визначення коефіцієнта форми шин

Умова механічної міцності шин відповідає рівнянню

$$\sigma_{розр.} = \sigma_{\phi} + \sigma_n \leq \sigma_{доп} \quad (4.13)$$

Якщо ця умова не дотримується, то слід зменшити  $f_{\phi}$  або  $f_n$ , що можна зробити, зменшивши  $l_{\phi}$  або  $l_n$  або збільшивши  $a$  чи  $W_{\phi}$ .

Максимально допустима відстань між прокладками

$$l_{n, макс} = \sqrt{12(\sigma_{доп} - \sigma_{\phi}) W_n / f_n} \quad (4.14)$$

Остаточні значення  $l_n$  приймають з конструктивних міркувань (довжина  $l_n$  повинна бути кратною 1).

## 4.2. Перевірка шин на термічну стійкість

Перевірка шин на термічну стійкість при коротких замиканнях виконується за умовою  $S_{мін.} \leq S$ , (4.15)

де  $S_{мін.}$  – мінімальний переріз за термічною стійкістю,  $мм^2$

$$S_{мін.} = \frac{\sqrt{B}}{C}, \quad (4.16)$$

де  $C$  – функція, значення якої встановлюють за спеціальними таблицями. Для

алюмінієвих шин  $C = 91 \times 10^{-3} \frac{\kappa A \sqrt{C}}{мм^2}$ .

Остаточні приймають більший переріз.

Згідно п. 1.3.28 ПУЕ, ошиновку в межах відкритих і закритих розподільних установок всіх напруг за економічною щільністю струму не перевіряють.

## 4.3. Вибір ізоляторів

Опорні й прохідні ізолятори розподільних установок вибирають за умов

$$U_{ном.уст.} \leq U_{ном.із.}; \quad (4.17)$$

$$F_{розр.} \leq F_{доп.}, \quad (4.18)$$

де  $U_{\text{ном.уст.}}$ ,  $U_{\text{ном.із.}}$  – номінальна напруга установки й ізолятора відповідно;  $F_{\text{розр.}}$  – розрахункове зусилля, що діє на ізолятор, Н;  $F_{\text{доп.}}$  – допустиме зусилля на ізолятор, Н.

Розрахункове зусилля для опорних ізоляторів визначають за формулою

$$F_{\text{розр.}} = F_{\phi} l k_h, \quad (4.19)$$

де  $k_h$  – поправочний коефіцієнт на висоту шини; якщо шини встановлені пліском, то  $k_h = 1$ , якщо на ребро, то  $k_h = \frac{H}{H_{\text{із}}} (H_{\text{із}} + b + \frac{h}{2})$ . У цій формулі  $H_{\text{із}}$  – висота ізолятора,  $H$  – висота від основи ізолятора до середини шини.

Розрахункове зусилля для прохідних ізоляторів

$$F_{\text{розр.}} = 0.5 f_{\phi} l \quad (4.20)$$

Крім того, прохідні ізолятори необхідно вибрати за припустимим струмом, виходячи з умови

$$I_{\text{макс.}} \leq I_{\text{ном.}} \quad (4.21)$$

Припустиме зусилля  $F_{\text{доп.}}$  приймають рівним  $0,6 F_{\text{руйн.}}$ , значення руйнівного зусилля  $F_{\text{руйн.}}$  наводиться в каталогах на ізолятори.

### **Приклад:**

Вибрати шини, прохідні і опорні ізолятори для кола закритої розподільної установки струм у якому складає  $I_{\text{розр}} = 2549$  А, напруга установки 10 кВ, відстань між фазами  $a = 0,5$  м, відстань між опорним ізоляторами  $l = 1,5$  м. Ударний струм короткого замикання  $i_{y0} = 26,6$  кА, інтеграл Джоуля  $W_k = 8,9$  кА<sup>2</sup>с.

### **Рішення:**

Ошиновку закритих РУ 10 кВ виконують твердими шинами. Для струму  $I_{\text{розр}} = 2549$  А згідно з таблицею 7.3 [3] приймаємо двосмугові прямокутні алюмінієві шини 120×8 мм зі сплаву АД 31Т, для яких  $I_{\text{прип}} = 2650$  А. За термічною стійкість струмам КЗ переріз має бути рівним

$$S_{\text{мін.}} = \frac{\sqrt{B}}{C} = \frac{\sqrt{8,9}}{91 \times 10^{-3}} = 32,8 \text{ мм}^2 < 19,2 \text{ мм}^2.$$

Прийнятий переріз відповідає умовам термічної стійкості.

Частота власних коливань для алюмінієвих шин визначається за (4.1), а момент інерції – за (4.3):

$$J = \frac{k \times b \times h^3}{12} = \frac{2 \times 0,8 \times 12^3}{12} = 230,4 \text{ см}^4$$

$$f_0 = \frac{173.2}{l^2} \sqrt{\frac{J}{S}} = \frac{173.2}{1.5^2} \sqrt{\frac{230.4}{19.2}} = 267 \text{ Гц},$$

Розрахунок  $f_0$  показує, що власна частота коливань шин не потрапляє в зону резонансних явищ.

Розрахункова механічна напруга для двосмугових шин визначається за (4.13), механічна напруга від взаємодії фаз – за (4.6), а від взаємодії смуг – за (4.11)

$$F_\phi = \frac{0.176 \times k_\phi \times i_{y_d}^2}{a} = \frac{0.176 \times 1 \times 26.6^2}{0.5} = 249.1 \text{ Н}$$

$$M_\phi = \frac{F l^2}{10} = \frac{249.1 \times 1.5^2}{10} = 56.01 \text{ Н} \times \text{м}$$

$$W = \frac{k b h^2}{6} = \frac{2 \times 0.8 \times 12^2}{6} = 38.4 \text{ см}^3$$

$$\sigma_\phi = \frac{M}{W} = \frac{56.01}{38.4} = 1.46 \text{ МПа}$$

$$F_n = 0.025 \frac{k_\phi i_y^2}{b} = 0.025 \frac{1 \times 13.3^2}{0.8} = 5.53 \text{ Н}$$

Це зусилля при будь-якому розташуванні багатосмугових шин діє на широку грань, тому

$$W_n = \frac{b^2 h}{6} = \frac{0.8^2 \times 12}{6} = 1.28 \text{ см}^3$$

$$\sigma_n = \frac{F_n l_n^2}{12 W_n} = \frac{5.53 \times 0.75^2}{12 \times 1.28} = 0.21 \text{ МПа}$$

$l_n = 0.75 \text{ м}$  – відстань між прокладками;

$$\sigma_{\text{розр.}} = \sigma_\phi + \sigma_n = 1.46 + 0.21 = 1.67 \text{ МПа} < 90 \text{ МПа}$$

Механічна напруга в матеріалі шин не перевищує допустимої.

Розрахункове зусилля для опорних ізоляторів визначають за (4.19)

$$F_{\text{розр.}} = F_\phi l k_h = 249.1 \times 1.5 \times 1 = 373.7 \text{ Н}$$

За таблицею 5.7 [3] знаходимо ізолятор внутрішньої установки И 4-80 УХЛЗ з мінімальним руйнівним зусиллям на згинання 4000 Н. Припустимо зусилля для цього ізолятора складає

$$F_{\text{доп.}} = 0.6 F_{\text{руйн.}} = 0.6 \times 4000 = 2400 \text{ Н} > 373.7 \text{ Н}$$

Для прохідного ізолятора розрахункове зусилля визначається за (4.20)

$$F_{\text{розр.}} = 0.5 f_\phi l = 0.5 \times 249.1 \times 1.5 = 186.8 \text{ Н}$$

За таблицею 5.8 [3] знаходимо опорний ізолятор внутрішньої установки ИП 10/3150-3000 У2 з мінімальним руйнівним зусиллям на згин 30 кН і допустимим струмом  $I_{ном} = 3150$  А.

Прохідний ізолятор перевіряється за струмом (4.21)  $I_{макс.} \leq I_{ном.}; 3150 < 2549$ .

Відповідь: Приймаємо алюмінієві шини АД 31Т перерізом  $120 \times 80$ , опорний ізолятор И 4 – 80 УХЛ 3 і прохідний ИП 10/3150-3000 У2.

Таблиця 4.1 – Завдання до практичного заняття

Варіант	Напруга, кВ	Розрахунковий струм, $I_{розр}$ , А	Відстань між фазами, а, м	Відстань між ізоляторами, l, м	Ударний струм КЗ, $i_{уд}$ , кА	Інтеграл Джоуля, $кА^2с$
1	6,3	1000	0,4	1,0	3,5	25
2	10	1200	0,5	1,2	4,0	30
3	6,3	1400	0,5	1,3	5,5	35
4	35	100	1,0	1,4	4,0	15
5	6,3	1800	0,4	1,5	3,5	25
6	10	2000	0,5	1,6	4,0	30
7	6,3	2200	0,5	1,7	5,5	35
8	35	800	1,0	1,8	4,0	15
9	6,3	2600	0,4	1,9	3,5	25
10	10	2800	0,5	2,0	4,0	30
11	6,3	3000	0,5	2,1	5,5	35
12	35	900	1,0	2,2	4,0	15
13	6,3	1000	0,4	1,0	10,0	30
14	10	1200	0,5	1,2	12,5	40
15	6,3	1400	0,5	1,3	14,8	60
16	35	600	1,0	1,4	8,5	20
17	6,3	1800	0,4	1,5	10,0	30
18	10	2000	0,5	1,6	12,5	40
19	6,3	2200	0,5	1,7	14,8	60
20	35	400	1,0	1,8	8,5	20
21	6,3	2600	0,4	1,9	10,0	30
22	10	2800	0,5	2,0	12,5	40
23	6,3	3000	0,5	2,1	14,8	60
24	35	700	1,0	2,2	8,5	20

### **Контрольні запитання до практичного заняття**

1. З яких матеріалів виготовляються шини розподільних установок?
2. Якого перерізу шини використовуються найчастіше?
3. Для чого шини фарбують?
4. В які кольори фарбуються шини?
5. На якій відстані одна від одної встановлюються прокладки в двосмугових шинах?
6. За рахунок чого можна вийти за зону резонансних явищ системи шин?

## 5. ВИБІР ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ І НАПРУГИ

а) Вибір трансформаторів струму

Трансформатори струму вибирають:

за напругою установки 
$$U_{уст} \leq U_{ном} \quad (5.1)$$

за струмом 
$$I_{ном} \leq I_{1ном} ; I_{макс} \leq I_{1ном} \quad (5.2)$$

Номінальний струм повинен бути якомога ближчим до робочого струму установки, оскільки недовантаження первинної обмотки приводить до збільшення погрешностей;

за конструкцією і класом точності:

за електродинамічною стійкістю:

$$i_{уд} \leq k_{ед} \sqrt{2} I_{1ном} , i_y \leq i_{дин} \quad (5.3)$$

де  $i_{уд}$  – ударний струм КЗ за розрахунком;

$k_{ед}$  – кратність електродинамічної стійкості за каталогом;

$I_{1ном}$  – номінальний первинний струм трансформатора струму;

$i_{дин}$  – струм електродинамічної стійкості.

Електродинамічна стійкість шинних трансформаторів струму визначається стійкістю самих шин розподільної установки, внаслідок цього такі трансформатори за цією умовою не перевіряються;

за термічною стійкістю:

$$B_k \leq (k_m I_{1ном})^2 \times t_{тер} ; B_k \leq I_{тер}^2 \times t_{тер} \quad (5.4)$$

де  $B_k$  – тепловий імпульс за розрахунком;

$k_m$  – кратність термічної стійкості за каталогом;

$t_{тер}$  – час термічної стійкості за каталогом;

$I_{тер}$  – струм термічної стійкості;

за вторинним навантаженням

$$Z_2 \leq Z_{2ном} , \quad (5.5)$$



де  $Z_2$  – вторинне навантаження трансформатора струму;

$Z_{2\text{ном}}$ , Ом – номінальне допустиме навантаження трансформатора струму у вибраному класі точності.

Індуктивний опір струмових кіл невеликий, тому  $Z_2 \approx R_2$ . Вторинне навантаження складається з опору приладів, з'єднувальних проводів і перехідного опору контактів:

$$r_2 \approx r_{\text{приб}} + r_{\text{пр}} + r_{\text{к}} \quad (5.6)$$

Опір приладів визначається за виразом

$$r_{\text{приб}} = S_{\text{прил}} / I_2^2 \quad (5.7)$$

де  $S_{\text{прил}}$  - потужність, споживана приладами;

$I_2$  - вторинний номінальний струм приладу.

Опір контактів приймається 0,05 Ом при двох-трьох приладах і 0,1 Ом при більшому числі приладів. Опір з'єднувальних проводів залежить від їх довжини і перерізу. Щоб трансформатор струму працював у вибраному класі точності, необхідно витримати умову

$$r_{\text{приб}} + r_{\text{пр}} + r_{\text{к}} \leq Z_{2\text{ном}}$$

звідки

$$r_{\text{приб}} = Z_{2\text{ном}} - r_{\text{пр}} - r_{\text{к}} \quad (5.8)$$

Знаючи  $r_{\text{пр}}$ , можна визначити перетин з'єднувальних проводів:

$$q = \frac{\rho \times l_{\text{расч}}}{r_{\text{пр}}} \quad (5.9)$$

де  $\rho$  – питомий опір матеріалу проводу. Проводи з мідними жилами ( $\rho = 0,0175$ ) застосовуються у вторинних колах основного і допоміжного устаткування потужних електростанцій з агрегатами 100 МВт і більш, а також на підстанціях з вищою напругою 220 кВ і вище. В решті випадків у вторинних колах застосовуються проводи з алюмінієвими жилами ( $\rho = 0,0283$ );  $l_{\text{розн}}$  – розрахункова довжина проводів, залежна від схеми з'єднання трансформаторів струму.

Довжину з'єднувальних проводів від трансформатора струму до приладів (в один кінець) можна прийняти для різних приєднань приблизно рівній, м:

Всі кола ГРУ 6 – 10 кВ, окрім ліній до споживачів	40 – 60
Кола генераторної напруги блокових електростанцій .	20 – 40
Лінії 6 – 10 кВ до споживачів	4 – 6
Всі кола РУ:	
35 кВ	60 – 75
110 кВ	75 – 100
220 кВ	100 – 150
330-500 кВ	150 – 175
Синхронні компенсатори	25 – 40

Для підстанцій вказані довжини знижують на 15 – 20%.

Як з'єднувальні провідники застосовують багатожильні контрольні кабелі з паперовою, гумовою, поліхлорвініловою або поліетиленовою ізоляцією в свинцевій, гумовій, поліхлорвініловій або спеціальній теплостійкій оболонці. За умовами міцності переріз не повинен бути менше 4 мм<sup>2</sup> для алюмінієвих жил і 2,5 мм<sup>2</sup> для мідних жил (див. ПУЕ § 3.4.4). Переріз більше 6 мм<sup>2</sup> звичайно не застосовується.

#### б) Вибір трансформаторів напруги

Трансформатори напруги вибираються:

за напругою установки

$$U_{уст} \leq U_{ном} \quad (5.10)$$

за конструкцією і схемою з'єднання обмоток;

за класом точності;

за вторинним навантаженням

$$S_{2\Sigma} \leq S_{ном} \quad (5.11)$$

де  $S_{ном}$  – номінальна потужність у вибраному класі точності.

При цьому слід мати на увазі, що для однофазних трансформаторів, з'єднаних в зірку, слід узяти сумарну потужність всіх трьох фаз, а для з'єднаних за схемою відкритого трикутника – подвоєну потужність одного трансформатора;

$S_{2\Sigma}$  – навантаження всіх вимірювальних приладів і реле, приєднаних до трансформатора напруги, В А.

Для спрощення розрахунків навантаження приладів можна не розділяти по фазах, тоді

$$S_{2\Sigma} = \sqrt{\left(S_{\text{прил}} \cos \varphi_{\text{прил}}\right)^2 + \left(S_{\text{прил}} \sin \varphi_{\text{прил}}\right)^2} = \sqrt{P^2_{\text{прил}} + Q^2_{\text{прил}}} \quad (5.12)$$

Якщо вторинне навантаження перевищує номінальну потужність у вибраному класі точності, то встановлюють другий трансформатор напруги і частину приладів приєднують до нього.

Переріз проводів в колах трансформаторів напруги визначається за допустимою втратою напруги. Згідно ПУЕ втрата напруги від трансформаторів напруги до розрахункових лічильників повинна бути не більше 0.5%, а до щитових вимірювальних приладів – не більше 1,5% при нормальному навантаженні.

### ***Контрольні запитання до практичного заняття***

1. Пояснити призначення трансформаторів струму.
2. Пояснити призначення трансформаторів напруги.
3. За якими критеріями вибираються трансформатори струму?
4. За якими критеріями перевіряються трансформатори струму?
5. За якими критеріями вибираються трансформатори напруги?
6. За якими критеріями перевіряються трансформатори напруги?
7. Який мінімальний переріз провідників допускається у колі трансформаторів напруги

## 6. РОЗРАХУНОК ЗАЗЕМЛЕННЯ ПОНИЖУВАЛЬНОЇ ПІДСТАНЦІ 110 КВ

Згідно з Правилами улаштування електроустановок [1] мережі напругою 110 кВ і вище відносяться до мереж з великими струмами замикання на землю ( $\geq 500$  А) і працюють з ефективно заземленою нейтраллю. Для таких мереж опір пристрою заземлення повинен бути  $\leq 0.5$  Ом.

Розрахунок пристрою заземлення виконуємо згідно з методикою наведеною в [2].

Опір сітки заземлення з вертикальними електродами визначається за формулою

$$R = 0.443 \frac{\rho_2}{\sqrt{S}} \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^g + \frac{\rho_2}{L + nl_e}, \quad (6.1)$$

$$\text{де } g = \frac{2H}{\sqrt{S} + nl_e}; \quad l_e = l_1 + \frac{l_2 \rho_1}{\rho_2},$$

$\rho_1$  – питомий опір верхнього шару ґрунту, Ом×м;

$\rho_2$  – питомий опір нижнього шару ґрунту, Ом×м;

$L$  – сумарна довжина горизонтальних смуг, м;

$l_e$  – еквівалентна довжина вертикального електроду, м;

$n$  – кількість вертикальних електродів, шт.;

$S$  – площа сітки, м<sup>2</sup>.

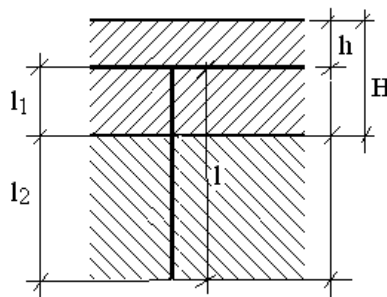


Рис. 6.1 – Схема, яка пояснює розрахунок еквівалентної довжини вертикального провідника в двошаровому ґрунті

Після розрахунку пристрою заземлення рекомендується врахувати опір  $R_{np}$  природних заземлювачів (система трос – опора, оболонки кабелів, обсадних труб свердловин і т. д.). Його значення можна прийняти рівним 2 – 4 Ом.

Загальний опір заземлення визначається за формулою

$$R_3 = \frac{RR_e}{R + R_e} \quad (6.2)$$

Ця величина повинна бути  $\leq 0.5$  Ом (для мережі з ефективно заземленою нейтраллю).

Якщо вказана умова не виконується, необхідно виконати розрахунок заземлення за напругою дотику  $U_{\text{дот}}$

$$U_{\text{дот}} = I_3 R_3 \alpha_{\text{дот}} \beta_{\text{дот}}, \quad (6.3)$$

де  $I_3$  – струм однофазного короткого замикання, А;

$$\alpha_{\text{дот}} = M \left( \frac{a\sqrt{S}}{lL} \right)^{0.45}, \quad (6.4)$$

$a = \frac{P}{n}$  – відстань між вертикальними електродами, м;

$P$  – периметр сітки, м;

$M$  – функція відношення  $\frac{\rho_1}{\rho_2}$  (сезонний коефіцієнт), таблиця 7.1;

$$\beta_{\text{дот}} = \frac{R_{\text{л}}}{R_{\text{л}} + 1.5\rho_c}, \quad (6.5)$$

$R_{\text{л}} = 1000$  Ом – розрахунковий опір тіла людини;

$\rho_c$  – питомий опір верхнього шару землі, Ом×м.

Таблиця 6.1 – Параметр М

$\rho_1/\rho_2$	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
$M$	0.37	0.40	0.43	0.46	0.48	0.50	0.60	0.66	0.72	0.76	0.77	0.79	0.80	0.81	0.82

Розрахункове значення напруги дотику не повинне перевищувати значення припустимої напруги дотику (табл. 6.2).

Таблиця 6.2 – Припустима напруга дотику

Тривалість дії струму, $t$ , с	До 0.1	0.2	0.5	0.7	1.0	Більше 1.0 до 5.0
Припустима напруга $U_{\text{прп}}$ , В	500	400	200	130	100	65

Час дії струму залежить від часу спрацювання захисту і вимикача, який вмикає коротке замикання (рекомендується для мережі з ефективно заземленою нейтраллю прийняти  $t = 0.2$  с).

Потенціал пристрою заземлення  $\phi_3$  не повинен перевищувати 10 кВ

$$\phi_3 = I_3 \times R_3. \quad (6.6)$$

Вертикальні електроди розташовуються по периметру підстанції, їх кількість приймається такою, щоб відстань між ними була більшою від їхньої довжини.

### ***Приклад розрахунку***

Розрахувати пристрій заземлення для підстанції 110/10 кВ за таких умов:  $S=4500 \text{ м}^2$  (75×60 м);  $l=8\text{м}$ ;  $n=30$  шт;  $H=2$  м;  $h=0.5$  м;  $\rho_1=120 \text{ Ом}\times\text{м}$ ;  $\rho_2=100 \text{ Ом}\times\text{м}$ ;  $I_3= 4000 \text{ А}$ .

План пристрою заземлення показаний на рис. 6.1. Він виконаний горизонтальними і вертикальними електродами (показані не заштрихованими колами). Сумарна довжина горизонтальних електродів складає

$$L = 3 \times 75 + 5 \times 60 = 525 \text{ м.}$$

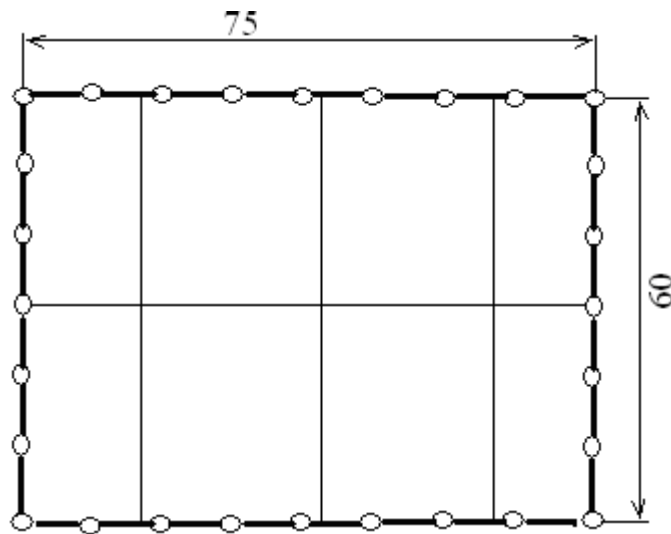


Рис. 6.1 – План пристрою заземлення підстанції

Визначаємо опір пристрою заземлення згідно (6.1)

$$R = 0.443 \frac{\rho_2}{\sqrt{S}} \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^g + \frac{\rho_2}{L + n l_e} = 0.443 \frac{100}{\sqrt{4500}} \left( \frac{120}{100} \right)^{0.0116} + \frac{100}{525 + 30 \times 9.3} = 0.784 \text{ Ом,}$$

$$\text{де } l_e = l_1 + \frac{l_2 \rho_1}{\rho_2} = 1.5 + \frac{6.5 \times 120}{100} = 9.3 \text{ м};$$

$$g = \frac{2H}{\sqrt{S} + nl_e} = \frac{2 \times 2}{\sqrt{4500} + 30 \times 9.3} = 0.0116.$$

Як видно з розрахунку опір штучного пристрою заземлення не відповідає нормі (0.5 Ом). Врахуємо опір природних заземлювачів. Такими будемо вражати систему «троси - опори», опір яких складає зазвичай 2 - 4 Ом. Тоді загальний опір заземлення з урахуванням природних заземлювачів буде

$$R_3 = \frac{RR_e}{R + R_e} = \frac{0.784 \times 3}{0.784 + 3} = 0.62 \geq 0.5 \text{ Ом}$$

Норма опору не виконується і в цьому разі, тому необхідно перевірити пристрій заземлення за напругою дотику.

$$\alpha_{dom} = M \left( \frac{a\sqrt{S}}{lL} \right)^{0.45} = 0.5 \left( \frac{9.0\sqrt{4500}}{8 \times 525} \right)^{0.45} = 0.089,$$

$$\text{де } a = \frac{P}{n} = \frac{270}{30} = 9.0 \text{ м; сезонний коефіцієнт } M=0.5.$$

Коефіцієнт дотику

$$\beta_{dom} = \frac{R_a}{R_a + 1.5\rho_c} = \frac{1000}{1000 + 1.5 \times 120} = 0.847$$

$$U_{dom} = I_3 \times R_3 \times \alpha_{dom} \times \beta_{dom} = 4000 \times 0.63 \times 0.089 \times 0.847 = 190 \text{ В.}$$

Припустиме значення напруги дотику при  $t = 0.2$  с складає 400 В. Розрахункове значення нижче нормативного – умова захисту виконується.

Потенціал пристрою заземлення  $\phi_3 = I_3 \times R_3 = 4000 \times 0.63 = 2520 \text{ В} < 10000 \text{ В.}$

Пристрій заземлення не відповідає вимогам першої норми (за опором), але розрахунок за другою нормою (напругою дотику) вказує на те, що він відповідає умовам безпеки при струмові короткого замикання 4000 А.

Таблиця 6.3 – Завдання для практичного заняття

Варіант	Розміри підстанції, м	Товщина верхнього шару ґрунту, м	Питомий опір верхнього шару ґрунту, Ом×м	Питомий опір нижнього шару ґрунту, Ом×м	Струм короткого замикання, А	Довжина вертикальних фектродів, м	Глибина закладення горизонтальних смуг, м
1	35×45	1,5	50	150	1500	5	0,5
2	35×50	1,6	60	140	1800	8	0,6
3	35×55	1,7	70	130	2000	6	0,7
4	35×60	1,8	80	120	2200	4	0,8
5		1,9	85	110	2400	5	0,5
6		2,0	90	100	2600	8	0,6
7		2,1	100	90	2800	6	0,7
8		2,2	110	80	3000	4	0,8
9		2,3	120	70	3200	5	0,5
10		1,5	130	60	3400	6	0,6
11		1,6	140	50	3600	7	0,7
12		1,7	150	85	3800	8	0,8
13		1,8	50	150	3800	4	0,5
14		1,9	60	140	3600	5	0,6
15		2,0	70	130	3400	6	0,7
16		2,1	8	120	3200	7	0,8
17		2,2	0	110	3000	8	0,5
18		2,3	90	100	2600	4	0,6
19		1,5	100	90	2400	5	0,7
20		1,6	110	80	2200	6	0,8
21		1,7	120	70	2000	7	0,5
22		1,8	130	60	1800	8	0,6
23		1,9	140	50	1500	4	0,7
24		1,5	150	85	2800	5	

### ***Контрольні запитання до практичного заняття***

1. Пояснити призначення пристроїв заземлення.
2. За якими критеріями виконується розрахунок заземлення?
3. Який опір повинне мати заземлення підстанції 110 кВ?
4. Від чого залежить допустима величина напруги доторкування?



## 7. РОЗРАХУНОК ЗАХИСТУ ВІД УДАРІВ БЛИСКАВКИ

### Методика розрахунку

Розрахувати блискавкозахист – це значить визначити тип захисту, його зону і параметри (табл. 7.1).

За типом блискавкозахист може бути:

- одно стрижньовим (1С);
- двох стрижньовим однакової або різної висоти (2С);
- багато стрижньовим;
- одиночним тросовим (1Т);
- багато тросовим (2Т).

За ступенем надійності захисту розрізняють два типи зон:

А – ступінь надійності захисту  $\geq 99,5 \%$ ;

Б – ступінь надійності захисту 95... 99,5 %.

Параметрами блискавкозахисту є:

$h$  – повна висота стрижньового блискавковідводу, м;

$h_0$  – висота вершини конуса стрижньового блискавковідводу, м;

$h_x$  – висота споруди, що захищається, м;

$h_m$  – висота стрижньового приймача блискавки, м;

$h_a$  – активна висота блискавковідводу, м;

$r_0, r_x$  – радіуси захисту на рівні землі і на висоті споруди, м, що захищається;

$h_c$  – висота середньої частини подвійного стрижневого блискавковідводу, м;

$2r_c, 2r_d$  – ширина середньої частини зони подвійного стрижньового блискавковідводу на рівні землі і на висоті об'єкту, що захищається, м;

$\alpha$  – кут захисту (між вертикаллю і твірною), град;

$L$  – відстань між двома стрижньовими громовідводами, м;

$a$  – довжина прольоту між опорами троса, м;

$h_{оп}$  – висота опори троса, м;

$r_x + r'_x$  – ширина зони тросового блискавковідводу споруди, що на рівні захищається, м;

$a + 2r_{cx}$  – довжина зони подвійного тросового блискавковідводу на рівні споруди, що захищається, м;

$a + 2r_c$  – довжина зони подвійного тросового блискавковідводу на рівні землі, м.

Таблиця 7.1 – Розрахункові формули громовідводів при  $h \leq 150$  м

Зона А	Зона Б
Одиночні стрижньові блискавковідводи (рисунок 7.1)	
$h_0 = 0,85 h$ $r_0 = (1,1 - 2 \times 10^{-3} h) \times h$ $r_x = (1,1 - 2 \times 10^{-3} h) \times (h - 1,2 h_x)$	$h_0 = 0,92 h$ $r_0 = 1,5 h$ $r_0 = 1,5 (h - 1,1 h) \times h_x$
Подвійні стрижньові блискавковідводи однакої висоти (рисунок 7.2)	
При $L \leq h$ $h_c = h_0$ $r_{cx} = r_x$ $r_c = r_0$	
При $h < L \leq 2h$ $h_c = h_0 - (0,17 + 3 \times 10^{-4} h) \times (L - h)$ $r_c = r_0$ $r_{cx} = r_0 (h_c - h_x) / h_c$	При $h < L \leq 6h$ $h_c = h_0 - 0,14 \times (L - h)$ $r_c = r_0$ $r_{cx} = r_0 (h_c - h_x) / h_c$
При $2h < L \leq 4h$ $h_c = h_0 - (0,17 + 3 \times 10^{-4} h) \times (L - h)$ $r_c = r_0 \{1 - [0,2 (L - 2h)] / h\}$ $r_{cx} = r_c (h_c - h_x) / h_c$ При $L > 4h$ Блискавковідводи розглядаються як одиночні	При $L > 6h$ Блискавковідводи розглядаються як одиночні
Подвійні стрижньові блискавковідводи різної висоти (рисунок 7.3)	
Габаритні розміри торцевих областей зон захисту $h_{01}, h_{02}, r_{01}, r_{02}, r_{x1}, r_{x2}$ визначаються як для одиночних стрижньових блискавковідводів. Габаритні розміри внутрішньої області зони захисту визначаються за формулами $r_c = 0,5 (r_{01} + r_{02})$ ; $h_c = 0,5 (h_{c1} + h_{c2})$ ; $r_x = (h_c - h_x) r_c / h_c$ . Значення $h_{c1}$ і $h_{c2}$ визначаються як для подвійних стрижньових блискавковідводів однакої висоти	
Багато стрижньові блискавковідводи (рисунок 7.4)	
Зони захисту будуються за допомогою попарно узятих сусідніх стрижньових блискавковідводів. Основною умовою захищеності одного або декількох об'єктів висотою з надійністю зон А або Б є $r_{cx} > 0$	
Одиночні тросові блискавковідводи (рисунок 7.5)	
$h_0 = 0,85 h$ $r_0 = (1,35 - 25 \times 10^{-4} h)$ $r_x = (1,35 - 25 \times 10^{-4} h) \times (h - 1,2 h_x)$	$h_0 = 0,92 h$ $r_0 = 1,7 h$ $r_x = 1,7(h - 1,1 h_x)$

Подвійні тросові блискавковідводи однакової висоти (рисунок 7.6)	
<p>При <math>L \leq h</math></p> $h_c = h_o$ $r_{cx} = r_x$ $r_c = r_o$	
Подвійні тросові блискавковідводи різної висоти (рисунок 7.7)	
<p>Значення <math>h_{o1}, h_{o2}, r_{o1}, r_{o2}, r_{x1}, r_{x2}</math> визначаються за формулами одиночних тросових блискавковідводів. Для визначення розмірів <math>r_c</math> і <math>h_c</math> використовуються формули</p> $r_c = 0,5 (r_{o1} + r_{o2}); h_c = 0,5 (h_{c1} + h_{c2}).$ <p>Значення <math>h_{c1}, h_{c2}, r'_{x1}, r'_{x2}, r'_{cx}</math> обчислюються за вказаними формулами подвійного тросового блискавковідводу.</p>	

Розрахунок очікуваної кількості уражень ( $N$ ) блискавкою в рік виконується за формулами:

– для зосереджених будівель і споруд (димарі, вежі, башти)

$$N = 9 \pi \times h_x^2 \times n \times 10^{-6}, \quad (7.1)$$

де  $h_x$  – найбільша висота будівлі або споруди, м;  $n$  – середньорічне число ударів блискавки в  $1 \text{ км}^2$  земної поверхні в місці знаходження будівлі або споруди (тобто питома густина ударів блискавки в землю),  $1/(\text{км}^2 \text{ рік})$ , визначається за табл. 8.2;

– для будівель і споруд прямокутної форми

$$N = [(B + 6h_x)(A + 6h_x) - 7,7 \times h_x^2] \times n \times 10^{-6} \quad (7.2)$$

де  $A$  і  $B$  – довжина і ширина будівлі або споруди, м.

Примітка. Якщо будівля і споруда мають складну конфігурацію, то  $A$  і  $B$  – це сторони прямокутника, в який вписується на плані об'єкт, що захищається.

Примітка. Для одиночного тросового блискавковідводу  $h$  – це висота троса в середині прольоту. З урахуванням провисання троса перерізом  $35...50 \text{ мм}^2$  при відомій висоті опор ( $h_{оп}$ ) і довжині прольоту ( $a$ ) висота троса (в метрах) визначається за формулами

$$h = h_{оп} - 2 \text{ – при } a \leq 120 \text{ м; } h = h_{оп} - 3 \text{ – при } 120 < a \leq 150 \text{ м.} \quad (7.3)$$

Таблиця 7.2 – Залежність  $F(t_{ср})$

$t_{ср}$ , год/рік	10...20	21...40	41...60	61...80	81...100	101 і більше
$n$ , $1/(\text{км}^2 \times \text{рік.})$	1	2	4	5,5	7	8,5

Примітка.  $t_{ср}$  – середньорічна тривалість гроз, годин/рік. Визначається за картами, складених на підставі метеозведень за 10 років.

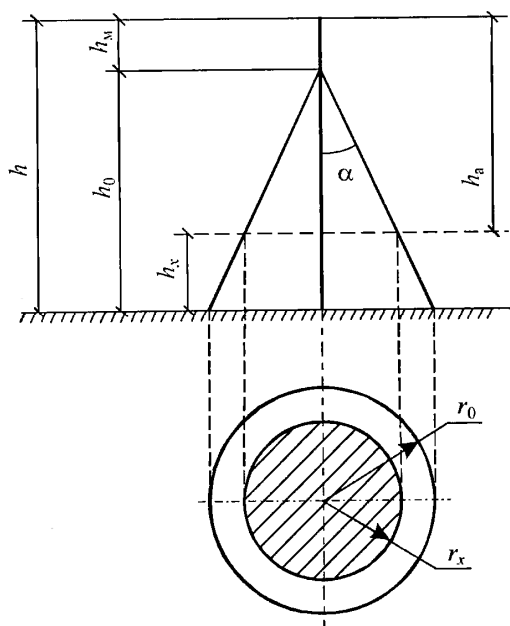


Рис. 7.1 – Зона захисту одиночного блискавковідводу

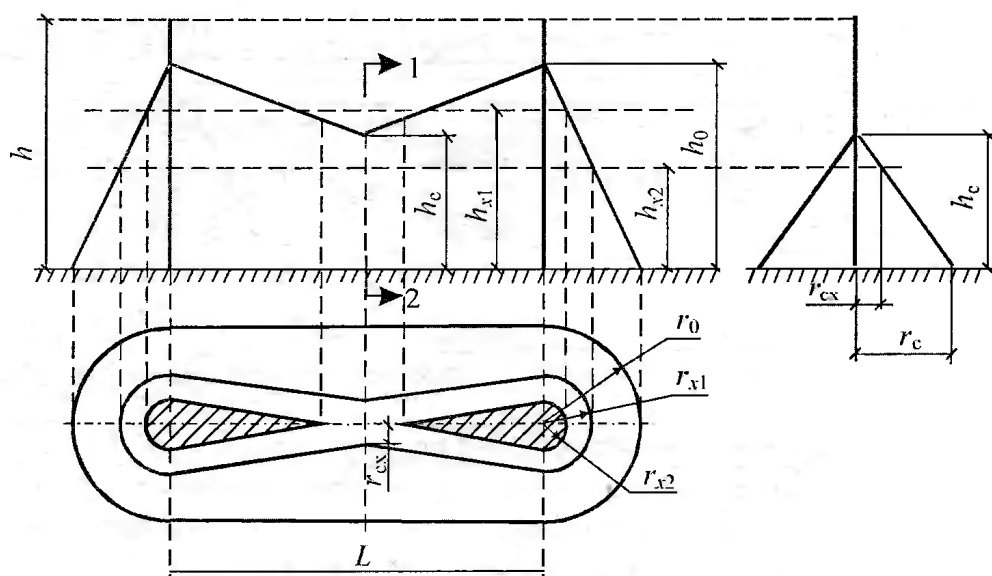


Рис. 7.2 – Зона захисту подвійного стрижньового блискавковідводу рівної довжини

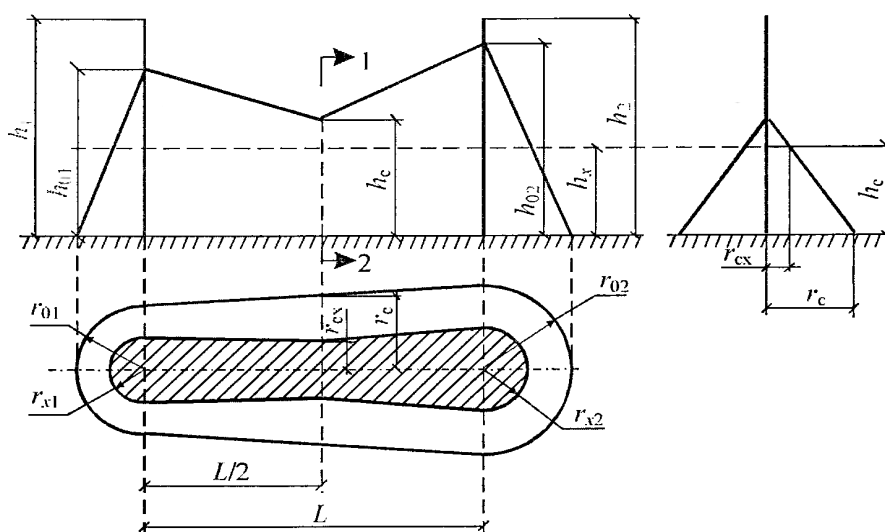


Рис. 7.3 – Зона захисту подвійного стрижньового блискавковідводу різної довжини

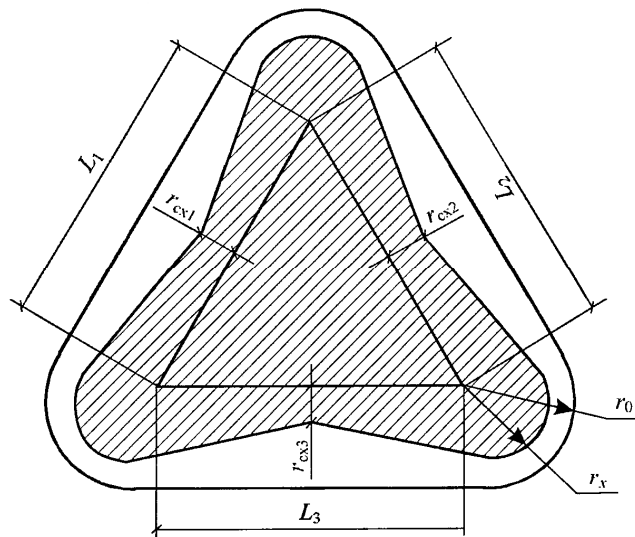


Рис. 7.4 – Зона захисту (в плані) багатократного стрижньового блискавковідводу

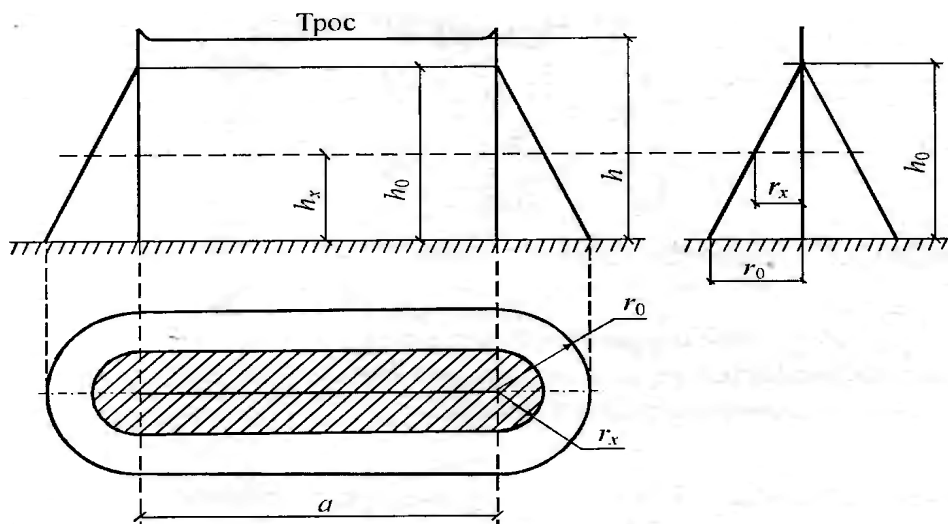


Рис. 7.5 – Зона захисту одиночного тросового блискавковідводу

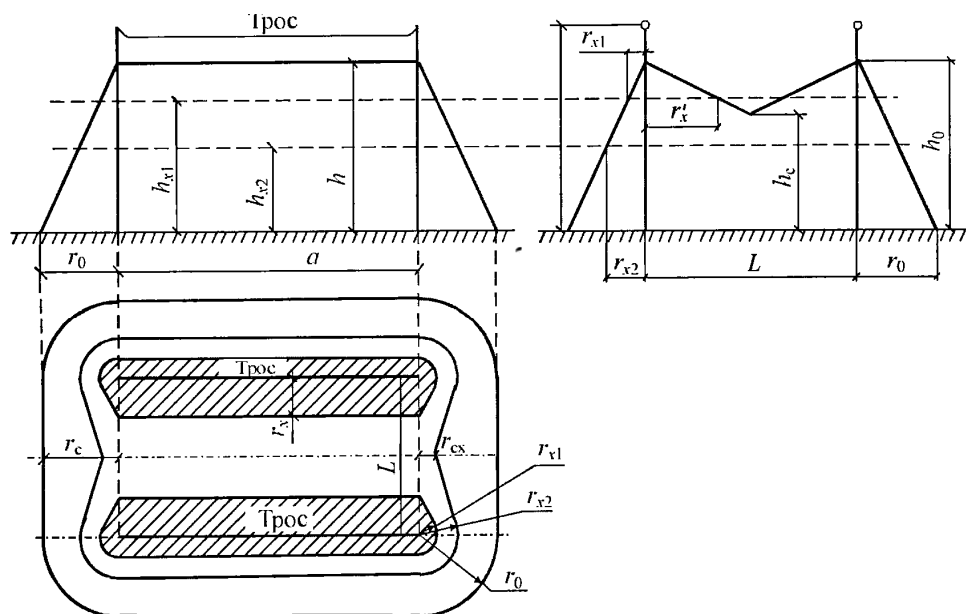


Рис. 7.6 – Зона захисту подвійного тросового блискавковідводу

### **Приклад 1.**

Дано:  $h = 50$  м;  $h_x = 20$  м;  $B = 20$  м;  $n = 6$  1/(км<sup>2</sup>тод).

Тип блискавкозахисту – однострижньовий. Визначити:

- параметри зон блискавкозахисту і зобразити їх;
- габаритні розміри об'єкту, що захищається;
- можливість ураження об'єкту.

#### **Рішення:**

1. За формулами (табл. 7.1) для одиночного стрижньового блискавковідводу визначаються параметри блискавкозахисту для зон.

В масштабі зображуються зони А і Б (рис. 7.8).

Зона А:

$$h_0 = 0,85h = 0,85 \times 50 = 42,5 \text{ м};$$

$$r_0 = (1,1 - 2 \times 10^{-3} h) h = (1,1 - 2 \times 10^{-3} \times 50) \times 50 = 50 \text{ м};$$

$$r_x = (1,1 - 2 \times 10^{-3} h) (h - 1,2 h_x) = (1,1 - 2 \times 10^{-3} \times 50) \times (50 - 1,2 \times 20) = 26 \text{ м};$$

$$h_m = h - h_0 = 50 - 42,5 = 7,5 \text{ м};$$

$$h_a = h - h_x = 50 - 20 = 30 \text{ м};$$

$$\alpha^{(A)} = \arctg(r_0/h_0) = \arctg(50/42,5) = 49,6^\circ.$$

Зона Б:

$$h_0 = 0,92 h = 0,92 \times 50 = 46 \text{ м};$$

$$r_0 = (1,5 h) = 1,5 \times 50 = 75 \text{ м};$$

$$r_x = 1,5 (h - 1,1 h_x) = 1,5 \times (50 - 1,1 \times 20) = 42 \text{ м};$$

$$h_m = h - h_0 = 50 - 46 = 4 \text{ м};$$

$$h_a = h - h_x = 50 - 20 = 30 \text{ м};$$

$$\alpha^{(B)} = \arctg(r_0/h_0) = \arctg(75/46) = 58^\circ.$$

2. Визначаються габаритні розміри об'єкту, що захищається, в кожній зоні блискавкозахисту. Для цього на відстані  $B/2$  від середньої лінії паралельно проводиться лінія до перетину з колом  $r_x$  (рис. 7.8).

Зона А:

$$\varphi^{(A)} = \arcsin(B/2 r_x^{(A)}) = \arcsin(20/2 \times 26) = 22,6^\circ$$

$$\cos \varphi^{(A)} = \cos 22,6^\circ = 0,92;$$

$$A^{(A)} = 2 r_x^{(A)} \cos \varphi^{(A)} = 2 \times 26 \times 0,92 = 48 \text{ м};$$

$$A \times B \times H = 48 \times 20 \times 20 \text{ м}.$$

Зона Б:

$$\varphi^{(B)} = \arcsin(B/2 r_x^{(B)}) = \arcsin(20/2 \times 42) = 13,8^\circ;$$

$$\cos \varphi^{(B)} = \cos 13,8^\circ = 0,97;$$

$$A^{(B)} = 2 r_x^{(B)} \cos \varphi^{(B)} = 2 \times 42 \times 0,97 = 81,6 \text{ м}; \text{ Приймаємо } A = 81 \text{ м.}$$

$$A \times B \times H = 81 \times 20 \times 20 \text{ м.}$$

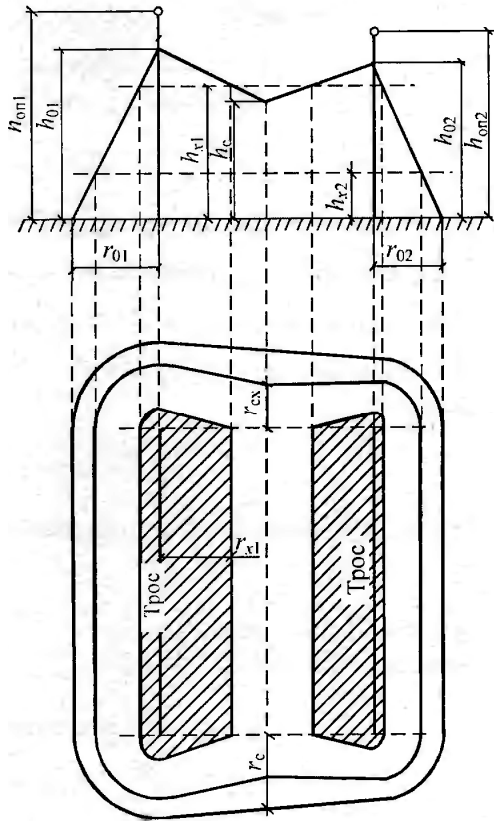


Рис. 7.7 – Зона захисту двох тросових блискавковідводів різної висоти

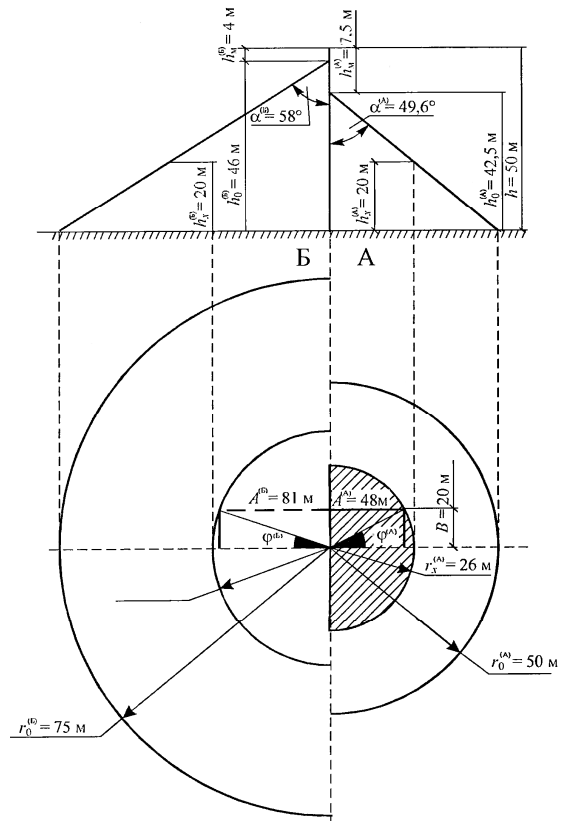


Рис. 7.8 – Зона захисту одиночного стрижньового блискавковідводу,  $h = 50 \text{ м}$

3. Визначається можливість ураження об'єкту, що захищається, в зонах за відсутності блискавки захисту.

$$N_A = [(B + 6h_x) \times (A^{(A)} + 6h_x) - 7,7h_x^2] \times n \times 10^{-6} =$$

$$= [(20 + 6 \times 20) \times (48 + 6 \times 20) - 7,7 \times 20^2] \times 6 \times 10^{-6} = 12,3 \times 10^{-2} \text{ уражень.}$$

$$N_B = [(B + 6h_x) \times (A^{(B)} + 6h_x) - 7,7h_x^2] \times n \times 10^{-6} =$$

$$= [(20 + 6 \times 20)(81 + 6 \times 20) - 7,7 \times 20^2] \times 6 \times 10^{-6} = 15 \times 10^{-2} \text{ уражень.}$$

В зоні захисту Б кількість уражень в рік більша.

Відповідь: Параметри зон блискавкозахисту вказані на рис. 7.8.

Для зони А:  $A \times B \times H = 48 \times 20 \times 20 \text{ м.}; N_A = 12,3 \times 10^{-2} \text{ уражень.}$

Для зони Б:  $A \times B \times H = 81 \times 20 \times 20 \text{ м.}; N_B = 12,3 \times 10^{-2} \text{ уражень.}$

### Приклад 2.

Дано: Тип захисту – подвійний тросовий  $h_{оп1} = h_{оп2} = 22 \text{ м}; h_x = 10 \text{ м}; L = 25 \text{ м}; a = 40 \text{ м}; n = 7 \text{ 1/(км}^2 \text{тод).}$

Необхідно визначити:

- параметри зони А захисту від ударів блискавки і зобразити її;
- габаритні розміри об'єкту, що захищається;
- можливу ураження об'єкту.

Рішення:

1. За формулами (табл. 7.1) для подвійних тросових блискавковідводів однакової висоти визначаються параметри захисту для зони А.

В масштабі зона А зображується на плані (рис. 7.9), оскільки

$$a < 120 \text{ м } h = h_{\text{оп}} - 2 = 22 - 2 = 20 \text{ м};$$

$$h_0 = 0,85 h = 0,85 \times 20 = 17 \text{ м};$$

$$r_0 = (1,35 - 25 \times 10^{-4} h) \times h = (1,35 - 25 \times 10^{-4} \times 20) \times 20 = 26 \text{ м};$$

$$h_c = h_0 - (0,14 + 5 \times 10^{-4} h) (L - h) =$$

$$= 17 - (0,14 + 5 \times 10^{-4} \times 20) (25 - 20) = 16,05 \text{ м}$$

$$r_c = r_0 = 26 \text{ м};$$

$$r_{cx} = r_0 (h_c - h_x) / h_c = 26 \times (16,05 - 10) / 16,05 = 9,8 \text{ м};$$

$$r_x = (1,35 - 25 \times 10^{-4} h) \times (h - 1,2 h_x) =$$

$$= (1,35 - 25 \times 10^{-4} \times 20) \times (20 - 1,2 \times 10) = 10,4 \text{ м}.$$

Примітка. При перетині верхньої відмітки споруди з лінією в прольоті визначається  $r'_x$ .

$$\alpha^{(B)} = \arctg (r_0 / h_0) = \arctg (26 / 17) = 56,8^\circ.$$

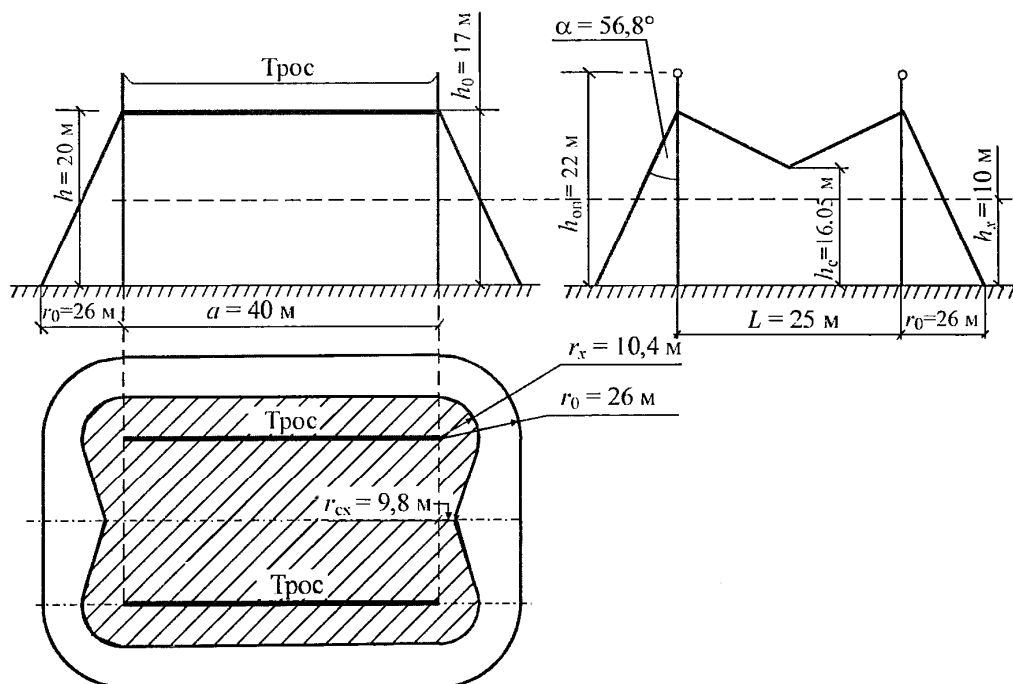


Рис. 7.9 – Зона А захисту подвійного тросового блискавковідводу однакової висоти



2. Визначаються максимальні габарити споруди, що захищається, за рис. 7.9:

$$A = a + 2 r_{cx} = 40 + 2 \times 9,8 = 59,6 \text{ м.}$$

Приймається ціле значення  $A = 59 \text{ м.}$

$$B = L + 2 r_x = 25 + 2 \times 10,4 = 45,8 \text{ м.}$$

Приймається ціле значення  $B = 45 \text{ м.}$

$$A \times B \times H = 59 \times 45 \times 10$$

3. Визначається можливість ураження об'єкту, що захищається, в зоні А за відсутності захисту.

$$N = [(B + 6h_x)(A + 6h_x) - 7,7 \times h_x^2] \times n \times 10^{-6} =$$

$$= [(45 + 6 \times 10)(59 + 6 \times 10) - 7,7 \times 10^2] \times 7 \times 10^{-6} = 8,2 \times 10^{-2} \text{ уражень.}$$

Відповідь: Параметри зони А блискавкозахисту вказані на рис. 7.9.

$$A \times B \times H = 59 \times 45 \times 10 \text{ м; } N = 8,2 \times 10^{-2} \text{ уражень.}$$

Таблиця 7.3 – Завдання до практичного заняття

Варіант	Тип блиска- вкозахисту	Зона	$h_x$ , м	B, м	$h_1$ , м	$h_2$ , м	L, м	a, м	$t_{сер}$ , год/рік
1	1С	А	20	15	40	—	—	—	110
2	2С	Б	20	20	50	50	50	60	100
3	2С	А	20	20	30	50	40	—	20
4	1Т	Б	15	—	32	—	40	—	30
5	2Т	А	15	—	32	32	20	40	40
6	2Т	Б	15	—	32	22	25	30	90
7	1С	Б	20	15	40	—	—	—	80
8	2С	А	10	12	45	25	50	—	50
9	2С	А	10	12	30	30	45	—	60
10	1Т	А	8	—	22	—	30	—	70
11	2Т	Б	8	—	22	27	30	45	110
12	2Т	Б	8	—	17	17	30	35	70
13	1С	А	12	10	35	—	—	—	100
14	2С	Б	15	15	50	50	35	—	60
15	2С	Б	15	15	50	40	40	—	20
16	1Т	А	16	—	27	—	40	—	50
17	2Т	А	12	—	22	27	35	20	30
18	2Т	Б	12	—	27	27	35	25	80
19	1С	А	25	30	60	—	—	—	40
20	2С	Б	16	20	50	40	50	—	90
21	2С	А	16	20	50	50	40	—	90
22	1Т	А	12	—	27	—	30	—	40
23	2Т	Б	8	—	17	22	25	30	80
24	2Т	Б	8	—	27	27	25	20	30

Примітка.

$L$  – відстань між двома стрижньовими блискавковідводами (для типу захисту 2С) або відстань між опорами тросового блискавковідводу (для типу Т);

$a$  – довжина прольоту між опорами троса (для типу захисту 2Т);

$h_1, h_2$  – висота опор (для типу захисту Т).

### ***Контрольні запитання до практичного заняття***

1. Пояснити призначення блискавковідводів.
2. Які існують типи грозозахисту?
3. В чому різниця між зонами захисту А і Б?
4. Назвати основні параметри грозозахисту.

### **ЛІТЕРАТУРА**

1. Электрическая часть станций и подстанций: Учеб. для вузов / А.А. Васильев, И.П. Крючков, Е.В. Наяшков и др.; Под ред. А.А. Васильева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
2. Неклепаев Б.Н. Электрическая часть станций и подстанций. Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
3. Рожкова Л.Д., Козулин В.С. Электрооборудование станций и подстанций. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
4. Рожкова Л.Д. Электрооборудование электрических станций и подстанций: учебник для студ. Проф. образования / Л.Д. Рожкова, Л.К. Карнеева, Т.В. Чиркова. – 4-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 448 с.
5. Гук Ю.Б., Кантан В.В., Петрова С.С. Проектирование электрической части станций и подстанций. Уч. пособие для вузов. – Л.: Энергоатомиздат, 1985.
6. Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. Электрическая часть станций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: Уч. пособие для вузов. – Л.: Энергоатомиздат, 1989.
7. Справочник по проектированию подстанций 35-500 кВ / Г.К. Вишняков, Е.А. Гоберман, С.Л. Гольцман и др. под ред. С.С. Рокотяна и Л.С. Самойлова. – М.: Энергоатомиздат, 1982.
8. ДНАОП 1.1.10-1.01-97 Правила безпечної експлуатації електроустановок, К.: 1998.

# НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

## МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

з курсу

### «ЕЛЕКТРИЧНА ЧАСТИНА СТАНЦІЙ ТА ПІДСТАНЦІЙ»

(для студентів 4 курсу денної та заочної форм навчання

напряму 6.050701 «Електротехніка та електротехнології»

спеціальності «Електротехнічні системи електроспоживання (за видами)» )

Укладачі: **Гаряжа** Василь Миколайович

**Дьяков** Євген Дмитрович

**Романченко** Валентіна Іванівна

Відповідальний за випуск *доц. В.М. Ковальов*

*В авторському редагуванні*

Комп'ютерне верстання *Н. В. Зражевська*

План 2010, поз. 249-М

---

Підп. до друку 17.12.2011

Друк на ризографі

Тираж 50 пр.

Формат 60 x 84 1/16

Ум. друк. арк. 2,1

Зам. №

Видавець і виготовлювач:

Харківська національна академія міського господарства,  
вул. Революції, 12, Харків, 61002

Електронна адреса: rectorat@ksame.kharkov.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК №4064 від 12.05.2011